

В.М. Агафонцев.

Размерные цепи.

ПРАКТИКА РАСЧЕТА.

Сборник знакомит читателя с понятием „размерная цепь“, с ее „материальным“ выражением и с ее расчетом, итогом которого является: получение необходимой точности детали, сборочной единицы, изделия с наименьшими затратами на их изготовление.

В сборник включены примеры расчетов размерных цепей, которые могут встретиться при проектировании и производстве изделий машиностроения.

Вероятностный метод, используемый при расчете в примерах, значительно упрощает процесс, не отражаясь на точности.

Сборник предназначен конструкторам и технологам опытных и серийных конструкторских организаций машиностроительной отрасли.

1. Что такое „размерная цепь“?

2

„Размерной цепью называем замкнутую цепь взаимосвязанных размеров, относящихся к одной или нескольким деталям, и координирующих относительное положение поверхностей или осей этих деталей.“

Профессор Бородачев [1]

Расчетом размерных цепей как отдельных деталей, так и сборочных единиц, устанавливается рациональная система расстановки размеров деталей на чертеже и благоприятное распределение допусков, обеспечивающее или полную взаимозаменяемость или с помощью соответствующего приема (метода) получение требуемой точности замыкающего звена.

Проектный расчет размерной цепи складывается из этапов:

- выявление исходного (замыкающего) звена;
- выявление составляющих звеньев, построение эскиза и схемы размерной цепи;
- назначение номинальных размеров и допускаемых отклонений составляющих звеньев, определение метода достижения точности замыкающего звена;
- определение передаточных отношений при составляющих звеньях, составление уравнения размерной цепи;
- уточнение и согласование параметров составляющих звеньев размерной цепи по результатам ее расчета, подтверждающего выполнение требуемой точности замыкающего звена.

По сборочным чертежам технического проекта машины выявляются и фиксируются требования точности, которые должны быть выдержаны при ее изготовлении, или конкретнее все исходные (замыкающие)

звенья размерных цепей.

По сборочным чертежам технического проекта машины выявляются точностные параметры деталей (линейные размеры, отклонения от соосности, перпендикулярности, плоскостности и др.), влияющие на конечную точность исходного (замыкающего) звена размерной цепи.

На сборочном чертеже технического проекта машины наносится изображение исходного (замыкающего) звена размерной цепи, находится сопряженный размер детали, примыкающей к исходному звену и непосредственно влияющий на его точность. Затем находится размер другой детали, сопряженной с размером первой детали, и влияющий на точность размера исходного звена. Так последовательно выявляются все размеры деталей сборочной единицы, сопряженные между собой и непосредственно влияющие на замыкающее звено размерной цепи. Последний из этих размеров примыкает к размеру исходного звена с другого его конца.

Все выявленные составляющие и исходное (замыкающее) звенья образуют замкнутый размерный контур — размерную цепь. Каждая деталь может участвовать в одной размерной цепи только одним своим размером (принцип кратчайшего пути).

Выявленные составляющие и замыкающее звенья размерной цепи изображаются в виде схемы на сборочном чертеже технического проекта или упрощенном эскизе анализируемой сборочной единицы.

Каждая размерная цепь обозначается заглавной буквой, например: А, Б, ... Т. и т.д.

Замыкающему звену размерной цепи присваивается индекс Σ , например: А Σ , Б Σ ... Т Σ .. и т.д.

Составляющие звенья размерной цепи нумеруются по-

рядковым номером, например: $A_1, A_2 \dots A_n$; $B_1, B_2 \dots B_n$; ...
 $T_1, T_2 \dots T_n$... и т.д.

Пример составления схемы размерной цепи замыкающего звена БЗ изображен на эскизе ступени редуктора (см. Схему размерной цепи Б).

В процессе конструктивной проработки технического проекта назначаются номинальные размеры деталям, входящим в данную сборочную единицу. Часть этих размеров predetermined условиями задания, результатами расчетов (прочностными, кинематическими, гидравлическими и др.) а также опытными данными. Есть размеры, назначенные по конструктивным соображениям.

Проводимые одновременно прикладные расчеты размерных цепей позволяют уточнить номинальные размеры, назначенные по конструктивным соображениям, в части технологичности конструкции и экономической целесообразности. А пробные расчеты размерных цепей позволяют распределить допуски на размеры составляющих звеньев самым благоприятным образом по части технологического обеспечения и получения непосредственно требуемой точности замыкающего звена или определить метод, который позволит замыкающему звену достигнуть требуемой точности.

Расчету размерной цепи предшествует построение ее уравнения. Для построения уравнения размерной цепи помимо составления ее схемы, необходимо определиться с передаточными отношениями при составляющих звеньях.

В линейных размерных цепях увеличивающие составляющие звенья имеют передаточное отношение

„плюс единица“, уменьшающие — „минус единица“.

Если составляющим звеном является угловой размер, а замыкающим линейный, то передаточное отношение определяется аналитически или графически.

Окончательный расчет размерной цепи выполняется в процессе рабочего проектирования машины. Результатом его является подтверждение обеспечения требуемой точности замыкающего звена и последующее согласование параметров составляющих звеньев.

Проследим этапы проектного расчета размерной цепи на примере конструкторской проработки редуктора, который представлен эскизом его ступени.

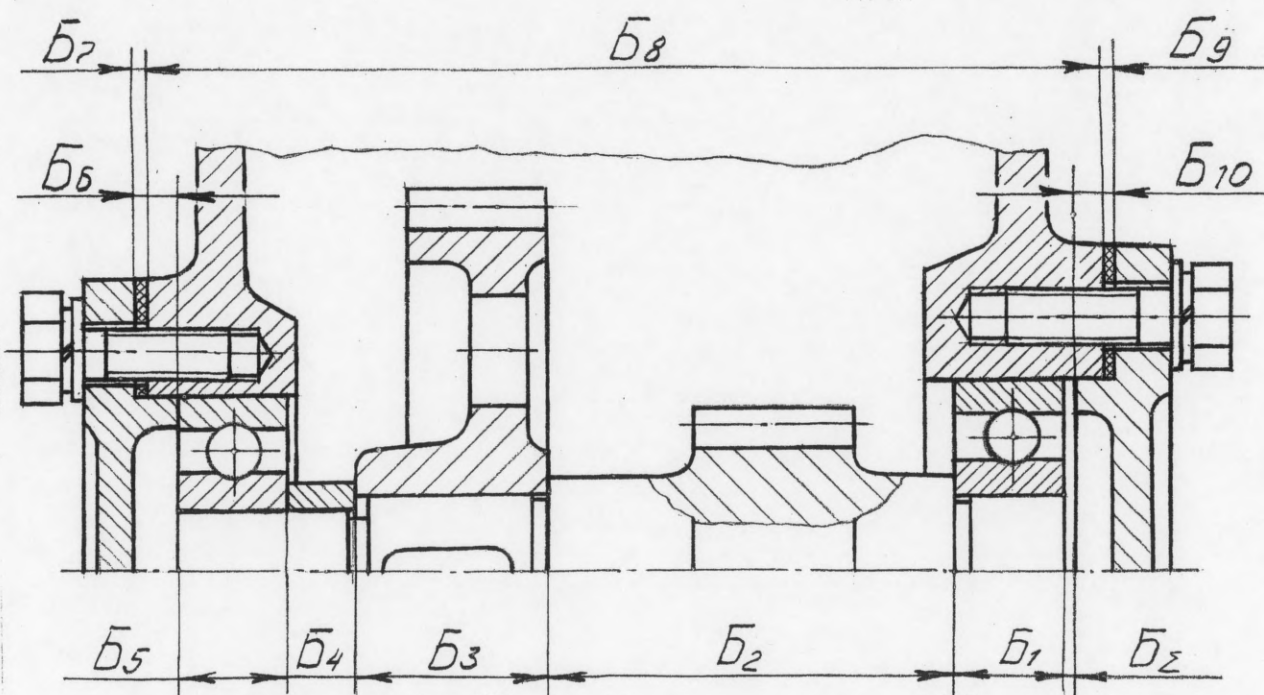


Схема размерной цепи Б.

Для обеспечения нормальной работы данной ступени редуктора необходимо, чтобы зазор между торцом наружного кольца правого подшипника и торцом бурта правой крышки (замыкающее звено B_{Σ}) был в пределах $0,2 \dots 0,4 \text{ мм}$.

Выявлены все составляющие звенья, которые влияют на точность замыкающего звена, это: $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9$ и B_{10} .

Номинальные размеры и допускаемые отклонения звеньев B_1 и B_5 назначены, как параметры покупных изделий, которые приняты к использованию в результате проведенных расчетов.

Номинальный размер звена B_3 - результат расчета на прочность.

Номинальные размеры звеньев $B_2, B_4, B_6, B_7, B_8, B_9$ и B_{10} назначены из конструктивных соображений и уточнены в результате прикидочных расчетов размерной цепи.

Допускаемые отклонения звеньев B_7 и B_9 - это допуски на толщину материала - паронита (ГОСТ 841-80).

Допускаемые отклонения на размеры звеньев B_2, B_3, B_4, B_6, B_8 и B_{10} выбраны из соображений технологической и экономической целесообразности.

Итак, имеем следующие характеристики составляющих звеньев:

$$B_1 = 28_{-0,13}; B_2 = 107_{-0,3}; B_3 = 50_{-0,2}; B_4 = 17_{-0,12}; B_5 = 26_{-0,11};$$

$$B_6 = 12^{+0,12}; B_7 = 1,2 \pm 0,15; B_8 = 250_{-0,3}; B_9 = 0,8 \pm 0,1; B_{10} = 12^{+0,12}.$$

По величине среднего распределенного допуска, равного $0,2/10 = 0,02$ приходим к заключению, что полную взаимозаменяемость в узле редуктора обеспечить не представляется возможным.

Требуемую точность замыкающего звена обеспечим методом подбора прокладок. Для этой цели используем прокладки из паронита ГОСТ 841-80, толщиной $0,4 \pm 0,1$.

При этом звено $B_7 = 1,2 \pm 0,15$ переведем на компози-

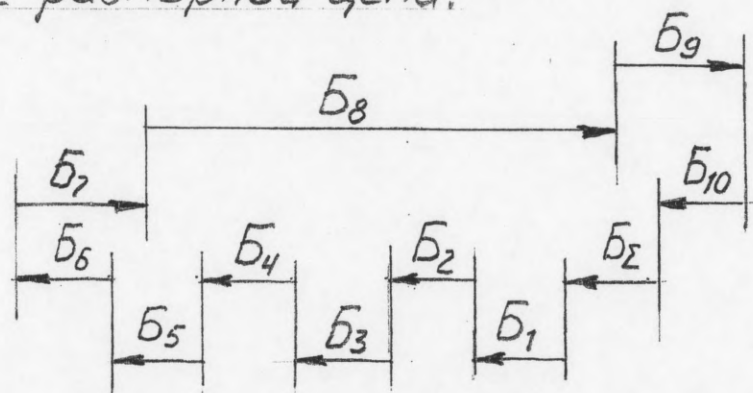
цию из трех прокладок, а звено $B_9 = 0,8 \pm 0,1$ — на композицию из двух прокладок.

В результате таких перестановок звено B_7 будет иметь параметры: $1,2 \pm 0,3$, а звено $B_9 - 0,8 \pm 0,2$.

Таблица №1

Составляющее звено	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
Размер и допускаемое отклонение	$28_{-0,13}$	$107_{-0,3}$	$50_{-0,2}$	$17_{-0,12}$	$26_{-0,11}$	$12^{+0,12}$	$1,2 \pm 0,3$	$250_{-0,3}$	$0,8 \pm 0,2$	$12^{+0,12}$
Передающее отношение	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1

Строим линейную размерную цепь для расчета зазора в узле редуктора и последующего определения поля допуска регулирования, а также уравнение размерной цепи.



$$B_{\Sigma} = -B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - B_5 - B_6 + B_7 + B_8 + B_9 - B_{10}.$$

Расчет выполним методом „максимум-минимум“.

Для удобства расчета перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №2).

Таблица №2

Составляющее звено размерной цепи (B_i)	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}
Размер (B_i)	-28	-107	-50	-17	-26	-12	1,2	250	0,8	-12
Верхнее отклонение (BD_i)	+0,13	+0,3	+0,2	+0,12	+0,11	0	+0,3	0	+0,2	0
Нижнее отклонение (HO_i)	0	0	0	0	0	-0,12	-0,3	-0,3	-0,2	-0,12

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$B_{\Sigma} = \sum_1 M_i \cdot B_i = 0; (BD)_{\Sigma} = \sum_1 (BD)_i = +1,36; (HO)_{\Sigma} = \sum_1 (HO)_i = -1,04; \text{ и окончательно: } B_{\Sigma} = 0^{+1,36}_{-1,04}.$$

Поле допуска регулирования равняется: $2\delta_p = 1,36 - (-1,04) = 2,4$. Для его заполнения требуется определенное количество прокладок с толщиной 0,4, а именно: $K = 2,4 / 0,4 = 6$ штук.

Продемонстрируем механизм подбора прокладок для обеспечения точности замыкающего звена B_{Σ} в ситуациях, которые могут иметь место в условиях производства.

Случай 1.

В результате сборки ступени редуктора зазор замыкающего звена получен равным 1,36 мм.

Для получения требуемой точности замыкающего звена снимаем с левой крышки две прокладки, а с правой — одну.

Случай 2.

В результате сборки ступени редуктора зазор замыкающего звена получился нулевым.

Для получения требуемой точности замыкающего звена на правую крышку устанавливаем дополнительную прокладку.

Случай 3.

В результате сборки ступени редуктора вместо зазора в замыкающем звене получен натяг в 1,04 мм.

Для получения требуемой точности замыкающего звена на левую крышку устанавливаем дополнительную прокладку, на правую крышку — две дополнительные прокладки.

Примечание. При подборе прокладок требуется учитывать допуск на их толщину.

2. Всё о размерных цепях.

9

„...Размерные цепи позволяют установить рациональную систему расстановки размеров деталей на чертежах и оптимальные допуски из условий полной взаимозаменяемости конструкции.“

„Советская Энциклопедия“,
М. 1985.

Прикидочные расчеты размерных цепей следует производить в процессе конструктивной проработки технического проекта, когда назначаются номинальные размеры, входящим в данную сборочную единицу деталям. Эти размеры назначаются исходя из условий задания, расчетов, опытных данных или конструктивных соображений. Вместе с номинальными размерами назначаются допуски на изготовление деталей исходя из особенностей конструкции, опыта эксплуатации подобных изделий и экономической целесообразности.

Полный расчет размерных цепей выполняется в процессе рабочего проектирования машины.

О прямой и обратной задаче. Проектный расчет размерных цепей обычно делается по наиболее распространенному на практике „способу проб“.

Вычисленный допуск замыкающего звена при назначенных допусках составляющих звеньев сравнивают с допуском исходного. При несовпадении – вносят приемлемые с технологической точки зрения изменения в допуски составляющих звеньев и вновь вычисленный допуск замыкающего звена сравнивают с исходным. Так с помощью расчета размерной цепи решается прямая задача – по параметрам замыкающего звена опреде-

ляются параметры составляющих звеньев.

С помощью расчета размерной цепи решается и обратная задача — определение параметров замыкающего звена по известным параметрам составляющих звеньев.

О методе на „максимум — минимум“. Одним из методов расчета размерных цепей является метод на „максимум — минимум“. Метод учитывает только предельные отклонения звеньев размерной цепи и самые неблагоприятные их сочетания. Этот метод не учитывает производственных возможностей и требует уменьшения абсолютных величин допусков размеров деталей. Такой метод расчета размерных цепей приемлем в малозвенных цепях (менее пяти).

О неполной взаимозаменяемости. Часто из-за технико-экономических соображений приходится отказываться от полной взаимозаменяемости конструкции и прибегать к неполной (ограниченной), применяя дополнительные приемы: компенсаторов, пригонки, регулирования, группового подбора деталей (селективной сборки), — или вероятностный метод расчета.

В Примере 1 (размерная цепь Б) используются приемы пригонки и подбора.

В Примере 2 (размерная цепь Н) использован прием селективной сборки.

О вероятностном методе расчета. Прежде чем говорить о прогрессивном методе расчета размерных цепей — вероятностном, полезно совершить экскурс в историю, чтобы лучше понимать неоднозначное отношение сегодня к этому методу.

Все производственные погрешности, имеющие место при изготовлении детали, по существу случайные ве-

личины и относятся к категории независимых, то есть закон распределения каждой погрешности не изменится от того какие значения принимают остальные погрешности.

Отсюда можно применять в части накопления независимых случайных ошибок все правила теории вероятностей:

- среднее значение результирующей ошибки равно алгебраической сумме средних значений составляющих ошибок;
- дисперсия результирующей ошибки равна сумме дисперсий составляющих ошибок; отсюда — среднее квадратическое отклонение результирующей ошибки равно корню квадратному из суммы квадратов средних квадратических отклонений составляющих ошибок.

Это касается погрешностей изготовления деталей.

В работе [1] автор пишет: „Вопросу о распределении отклонений размеров деталей и других производственных погрешностей по полю допуска уделялось за последние годы довольно большое внимание как в нашей, так и в иностранной технической литературе. Значительное количество авторов, базируясь на теоретических предпосылках (наличие условий содействующих возникновению закона Гаусса) или на статистическом материале, более или менее категорически высказываются за принятие во всех случаях закона Гаусса. В частности к ним относятся академик Н.Г. Бруевич, профессор А.Б. Яхин, G. Schmaltz, А.П. Знаменский, М.Я. Кругер и Б.М. Кулижнов, Kizler, Fischer, Oebelshausen и др.“

В размерных цепях составляющими ошибками являются первичные ошибки размеров составляющих зве-

нью цепи.

Поскольку производственные погрешности изготовления деталей а также их комбинации от разных партий изготовления при передаче на сборку не всегда отвечают закону Гаусса, то требуется, как заявляет профессор Бородачев, для них корректировка по центру группирования погрешностей (коэффициент относительной асимметрии α_i) и по рассеиванию ошибки (коэффициент относительного рассеивания K_i). В результате профессор Бородачев предложил для расчета размерных цепей вероятностным методом следующую эмпирическую формулу:

$$\Delta_{пк} = \Delta_{ок} \pm \delta_k = \sum_s (\Delta_{os} + \alpha_s \delta_s) - \sum_t (\Delta_{ot} + \alpha_t \delta_t) \pm \sqrt{\sum_i K_i^2 \delta_i^2}; \text{ где:}$$

$\Delta_{пк}$ — практически предельное отклонение от номинала размера замыкающего звена;

$\Delta_{ок}$ — центр группирования (среднее значение) отклонений размеров замыкающего звена;

δ_k — практически предельное отклонение размера замыкающего звена от среднего значения $\Delta_{ок}$;

Δ_o — координата середины поля допуска составляющего звена;

δ — половина абсолютной величины поля допуска составляющего звена;

α — коэффициент относительной асимметрии;

K — коэффициент относительного рассеивания;

Суммирование по s относится к увеличивающим размерам, по t — к уменьшающим размерам, по i — к тем и другим.

Если ввести передаточное отношение A_i , то формула примет вид:

$$\Delta_{пк} = \Delta_{ок} \pm \delta_k = \sum_i A_i (\Delta_{oi} + \alpha_i \delta_i) \pm \sqrt{\sum_i A_i^2 K_i^2 \delta_i^2};$$

а для малозвенных размерных цепей (менее шести) —

$$\Delta_{\text{пк}} = \left[\sum_i A_i (\Delta_{oi} + \alpha_i \delta_i) - \alpha_{\Sigma} \delta_{\Sigma} \right] \pm \frac{1}{K_{\Sigma}} \sqrt{\sum_i A_i^2 K_i^2 \delta_i^2}, \text{ где:}$$

α_{Σ} — коэффициент относительной асимметрии замыкающего звена;

K_{Σ} — коэффициент относительного рассеивания замыкающего звена;

δ_{Σ} — половина поля допуска замыкающего звена.

Предложенная профессором Бородачевым формула, официально принятая в научных кругах как основополагающая для расчета размерных цепей вероятностным методом, оказалась неподъемной для применения в практику работы конструкторов и технологов из-за сложности расчета и отсутствия обоснованных данных по выбору коэффициентов α_i , K_i , α_{Σ} и K_{Σ} .

„Поэтому в некоторых отраслях машиностроения успешно внедрены упрощенные варианты методов вероятностного расчета, так же обеспечивающие возможность ощутимого расширения допусков составляющих звеньев цепи...“ — это откровение из справочника [5]. Авторы приводят пример „эмпирического шедевра“.

Об упрощенной формуле вероятностного метода. По мнению автора этих строк „изобретать велосипед“ не требуется, надо прислушаться интуитивным заявлениям ученых мужей — современников и коллег уважаемого профессора Бородачева и принять к действию смысл их высказываний. А это та же формула профессора Бородачева, если ее читать при условии: $\alpha_i = \alpha_{\Sigma} = 0$; $K_i = K_{\Sigma} = 1$:

$$\Delta_{\text{пк}} = \sum_i A_i \Delta_{oi} \pm \sqrt{\sum_i A_i^2 \delta_i^2}.$$

Именно этой формулой по имеющимся сведениям пользуются большинство конструкторов и технологов наших основных отраслей машиностроения. Много лет этой формулой пользовался и автор этих строк, работая на

ниве конструирования узлов изделий. В качестве подтверждения успешного применения этой формулы - расчет размерных цепей в Примере 6. Это межотсечное соединение успешно прошло в составе изделия все испытания и теперь проверено в серийном производстве и эксплуатации. Конечно, в данном случае большая роль принадлежит и хорошо отлаженной технологической цепочке „изготовление - сборка“ корпусов на заводе - производителе.

Ряд оппонентов профессора Бородачева высказывали опасения в том, что все „корректирующие довески“ в его формуле в результате расчета размерной цепи, особенно многозвенной, будут исключать друг друга.

Подтверждением этих прогнозов служит расчет двух размерных цепей взятых автором из методики [6].

В методике расчеты выполнены в полном соответствии с рекомендациями профессора Бородачева.

Автор при расчете этих размерных цепей пользовался упрощенной формулой (Размерные цепи: А, Пример 5; В, Пример 10).

Результаты расчетов в методике и автора полностью совпали.

Это говорит о правомерности применения для расчетов размерных цепей вероятностным методом упрощенной формулы.

Для полной легитимности применения упрощенной формулы требуется только ее „сертификат риска“ в зависимости от количества звеньев в размерной цепи. Хотя, как показывает практика, производство „безшумно“ воспринимает „сбои“ возникающие из-за „неполной достоверности“ вероятностного метода расчета размерных цепей, так как для их устранения требуются обычно незначительные затраты в противовес той экономии, ко-

торая имеет место за счет расширения допусков на изготовление деталей.

О линейных и угловых размерных цепях. Все сказанное выше относится к линейным размерным цепям, образованным только параллельными линейными размерами, а также угловым размерным цепям, образованным одними угловыми размерами, при общей для всех углов вершине. Расчет угловой размерной цепи показан в Примере 9.

О плоскостных размерных цепях. В плоскостных размерных цепях все или некоторые составляющие звенья не параллельны как между собой, так и замыкающему звену. Расчет плоскостных размерных цепей усложняется тем, что помимо линейных ошибок составляющих звеньев, требуется учитывать ошибки угловых направлений их относительно замыкающего звена.

В. В. Цванов в работе [4] дает рекомендации по расчету плоскостных размерных цепей. Плоскостную размерную цепь преобразуют в линейную путем проектирования ее составляющих звеньев на замыкающее звено.

При проектировании определяют максимальный, номинальный и минимальный размеры каждого спроектированного звена, после чего назначается его размер с предельными допусками. Далее линейная размерная цепь, преобразованная из плоскостной, рассчитывается по методикам для линейных одномерных размерных цепей. Расчет плоскостных размерных цепей приведен в Примере 7 и в Примере 8.

Профессор Бородачев в работе [2] предложил свою формулу для расчетов плоскостных размерных цепей. Но примеров ее применения в практике расчета таких размерных цепей в методической литературе не имеется.

О связанных размерных цепях. Расчет так называе-

мых связанных размерных цепей, как-то: параллельных, в которых общими для двух или нескольких размерных цепей являются составляющие звенья; последовательных, в которых замыкающее звено одной размерной цепи является составляющим звеном второй размерной цепи, и, наконец, комбинированных, в которых замыкающее и составляющие звенья одной цепи являются составляющими звеньями второй размерной цепи, — ничего нового не несет.

Может быть требуется только соблюдения определенной последовательности расчетов размерных цепей, которая легко улавливается в процессе расчета и трудности для его выполнения не составит.

Некоторым неудобством может быть организация учета входимости одних звеньев размерной цепи в другие, поскольку при изменении параметров одного связанного звена одной размерной цепи требуется изменение этих параметров связанного звена другой цепи и, следовательно, ее перерасчет. Но такой учет входимости связанных звеньев в размерных цепях можно организовать через введение „Ведомости“ размерных цепей. Это на предприятиях, в которых чертежное хозяйство нормально функционирует, совсем не сложно.

В Примере 6 показан расчет параллельно связанных размерных цепей; в Примере 8 — последовательно связанных.

О пространственных размерных цепях. В Примерах 9, 10 и 11 показаны расчеты пространственных размерных цепей.

Пространственной размерной цепью называем размерную цепь, у которой звенья находятся в непараллельных плоскостях.

Если в линейных размерных цепях все ошибки суммируются как скалярные, включая зазоры и векторные оши-

бки, то при расчете пространственной размерной цепи они суммируются сначала по принадлежности: векторные ошибки, зазоры и скалярные ошибки.

Формулы для суммирования векторных ошибок.

$$(\delta_{\Sigma}')^2 = M_i^2 \delta_i^2 + \sum_i M_i^2 \cdot k_{xi}^2 \cdot \delta_i^2, \text{ где:}$$

M_i — передаточное отношение суммируемой векторной ошибки;

δ_i — половина поля допуска векторной ошибки;

k_{xi} — приведенный коэффициент, принят равным 0,79;

δ_{Σ}' — половина поля рассеивания размера замыкающего звена от векторных ошибок;

$\alpha_{\Sigma}' = 0$. Координата середины поля рассеивания размера замыкающего звена от векторных ошибок равна нулю.

Формулы для суммирования ошибок от зазоров.

$$(\delta_{\Sigma}'')^2 = \frac{1}{4} \sum_i M_i^2 (\delta_{ai}^2 + \delta_{bi}^2), \text{ где:}$$

M_i — передаточное отношение суммируемой ошибки от зазора;

δ_{ai} — половина поля допуска размера отверстия;

δ_{bi} — половина поля допуска размера вала;

δ_{Σ}'' — половина поля рассеивания размера замыкающего звена от зазоров.

$$\alpha_{\Sigma}'' = \frac{1}{2} \sum_i |M_i| [(N_{ai} - N_{bi}) + (\alpha_{ai} - \alpha_{bi})], \text{ где:}$$

M_i — передаточное отношение;

N_{ai}, N_{bi} — номинальные размеры отверстий и валов;

α_{ai}, α_{bi} — координата середины поля допуска размеров отверстий и валов;

α_{Σ}'' — координата середины поля рассеивания размера замыкающего звена от зазоров.

Формулы для суммирования скалярных ошибок.

$$(\delta_{\Sigma}''')^2 = \sum_i M_i^2 \delta_i^2, \quad \text{где:}$$

M_i — передаточное отношение;

δ_i — половина поля допуска скалярной ошибки;

δ_{Σ}''' — половина поля рассеивания замыкающего звена от скалярных ошибок.

$$\alpha_{\Sigma}''' = \sum_i M_i \alpha_i, \quad \text{где:}$$

M_i — передаточное отношение;

α_i — середина поля допуска скалярной ошибки;

α_{Σ}''' — координата середины поля рассеивания размера замыкающего звена от скалярных ошибок.

Если положение деталей в поле зазора после их сборки произвольное, то в этом случае имеем дело с векторными зазорами. Формулы для суммирования ошибок от векторных зазоров приводим ниже.

$$(\delta_{\Sigma}^{IV})^2 = M_i^2 \delta_i^2 + \sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot K_{xi}^2 \cdot \delta_i^2, \quad \text{где:}$$

$$\delta_i = \frac{1}{2} [(N_{ai} - N_{bi}) + (\alpha_{ai} - \alpha_{bi})] + \sqrt{\delta_{ai}^2 + \delta_{bi}^2};$$

M_i — передаточное отношение;

δ_i — половина общей величины зазора составляющего звена;

K_{xi} — приведенный коэффициент, принят равным 0,79;

N_{ai}, N_{bi} — номинальные размеры отверстия и вала составляющего звена;

α_{ai}, α_{bi} — координаты середины полей допусков размеров отверстия и вала составляющего звена;

δ_{ai}, δ_{bi} — половинны полей допусков размеров отверстия и вала составляющего звена;

Σ_{Σ}^{IV} — половина поля рассеивания размера замыкающего звена от векторных зазоров.

$\alpha_{\Sigma}^{IV} = 0$. Координата середины поля рассеивания замыкающего звена от векторных зазоров равна нулю.

Половина поля рассеивания замыкающего звена от всех ошибок равна корню квадратному из суммы квадратов половин полей рассеивания замыкающего звена от ошибок по принадлежности.

Координата середины поля рассеивания замыкающего звена от всех ошибок равна алгебраической сумме координат середин полей рассеивания размера замыкающего звена от ошибок по принадлежности.

Завершается расчет пространственной размерной цепи определением предельных отклонений размера замыкающего звена.

Результат расчета пространственной размерной цепи достоверно определяет порядок искомой величины. По нему принимаются дальнейшие действия, направленные на получение требуемого качества узла и машины в целом. Так результат расчета пространственной размерной цепи в Примере 11 показал значительное превышение от заданного отклонения оси корпуса. Поэтому для обеспечения взаимозаменяемости потребуются совместная обработка собранных отсеков. Результат расчета помогает определить оптимальный припуск на эту мехобработку.

О передаточном отношении при составляющих звеньях. Передаточное отношение при составляющих звеньях размерной цепи служит коэффициентом, характеризующим степень влияния отклонения составляющего звена на отклонение замыкающего.

В линейных размерных цепях (размерные цепи Б, Н, К, Л, А, Р, С, Т, Ч, И и преобразованные из плоскостных размерные цепи П и Ж) уменьшающие составляющие звенья имеют передаточное отношение „минус единица“, увеличивающие звенья — „плюс единица“.

В угловой размерной цепи Д (Пример 9) имеем четыре разновидности передаточного отношения: переводное, согласующее, комбинированное и „плюс единица“.

Переводное передаточное отношение, равное $\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$, относится к звеньям D_1, D_3 и D_5 . Здесь имеет место перевод размерности отклонения составляющего звена в минуты (') в размерность в мм (в длину дуги или отрезок касательной), в которых суммируются отклонения составляющих звеньев угловой размерной цепи.

Согласующее передаточное отношение, равное $1,12 = \frac{277}{247}$, относится к звену D_8 . Здесь линейная ошибка (отклонение составляющего звена D_8), заданная на радиусе 247, пересчитана на радиус 277, на котором идет линейное суммирование отклонений составляющих звеньев угловой размерной цепи.

Комбинированное передаточное отношение, равное $\frac{\pi \cdot 247}{180 \cdot 60} \cdot 1,12$, относится к звену D_7 . Здесь имеет место как перевод размерности отклонения составляющего звена в минуты в размерность в мм, так и перерасчет полученного линейного отклонения с радиуса 247 на радиус 277.

„Плюс единица“ — передаточное отношение составляющих звеньев D_2, D_4 и D_6 . Отклонение у этих звеньев линейные и расположены на радиусе 277, поэтому перевода и перерасчета для них не требуется.

В пространственной размерной цепи Г (Пример 11) у составляющих звеньев G_4, G_5, G_9 и G_{10} передаточные отношения равно $\frac{1500 \cdot 2}{578}$, а у G_{14} и G_{15} — $\frac{940 \cdot 2}{578}$. Во столько раз увели-

чивается половина допуска прямолинейности оси соответствующего отсека по отношению половине допуска перпендикулярности собственной или смежной торцовых поверхностей относительно осей соответствующих отсеков. Где: 1500 и 940 – длины отсеков; 578 – диаметр наружной поверхности.

Передаточное отношение у остальных составляющих звеньев размерной цепи Г – „плюс единица“, так как их отклонения в результате сборки не претерпевают изменения и они суммируются в начально заданном варианте.

Аналогично определены передаточные отношения соответствующих составляющих звеньев размерной цепи В (Пример 10).

Об оформлении расчетов размерных цепей. Конструкторские размерные цепи рассчитываются и оформляются конструктором естественно в виде чертежей в соответствии с действующими стандартами.

Чертежи размерных цепей со своими индексами комплектуются по принадлежности к сборочным единицам изделия и входят в комплект конструкторской документации.

В технических требованиях сборочных чертежей изделия при использовании результатов расчета размерных цепей должна быть ссылка на соответствующие чертежи размерных цепей.

3. Практика расчета размерных цепей. 22

ПРИМЕР 1.

Расчет зазора между компенсирующим и упорным кольцами.

Рис.1

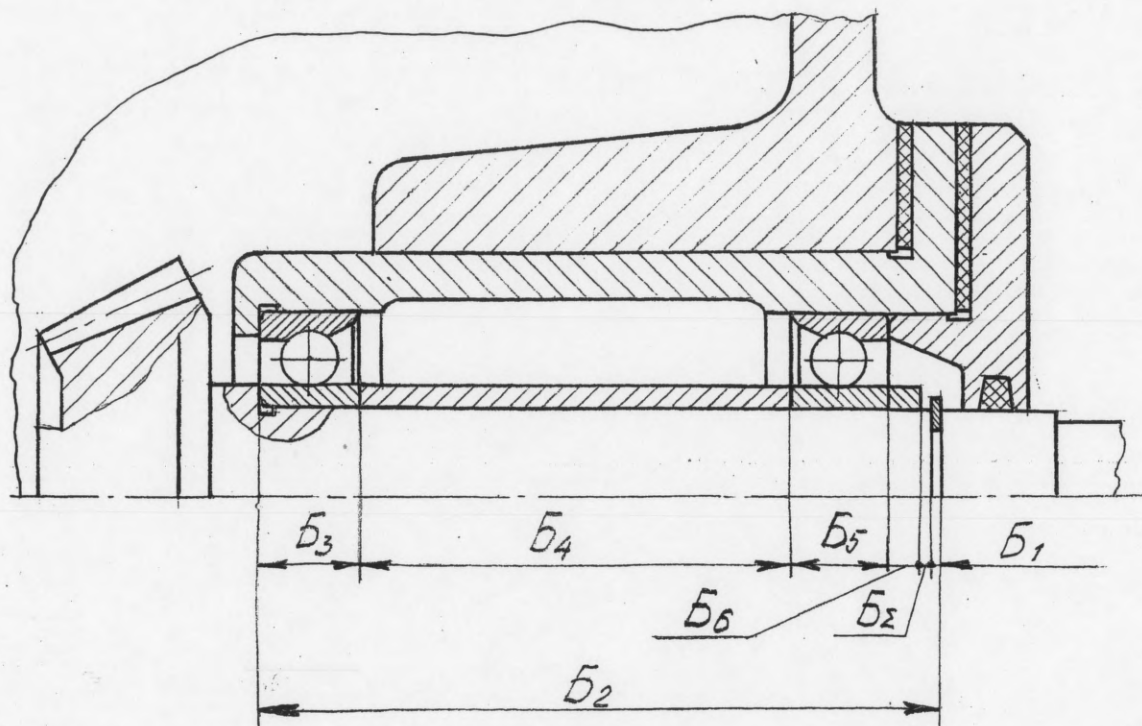


Схема размерной цепи Б.

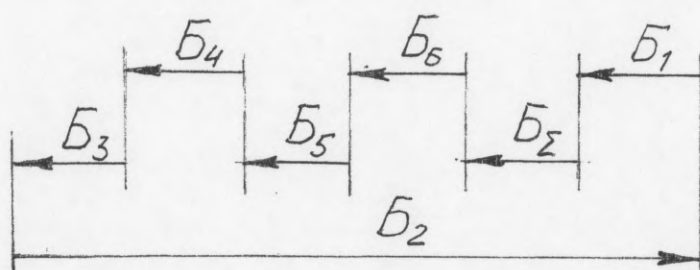
В собранном редукторе необходимо иметь зазор между компенсирующим и упорным кольцами в пределах $0,05 \dots 0,15$ мм (замыкающее звено B_7).

Расчитаем размерную цепь, составляющими звеньями которой являются: B_1 – толщина упорного кольца; B_2 – расстояние между торцами конической шестерни; B_3 – ширина подшипника; B_4 – длина распорной втулки; B_5 – ширина подшипника; B_6 – толщина компенсирующего кольца.

Таблица №1

Составляющее звено	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
Размер и допускаемые отклонения	$2 \pm 0,05$	$112 \pm 0,12$	$23_{-0,12}$	$60_{-0,2}$	$23_{-0,12}$	$4_{-0,05}$

Строим линейную размерную цепь для расчета зазора между компенсирующим и упорным кольцами и ее уравнение.



$$B_{\Sigma} = -B_1 + B_2 - B_3 - B_4 - B_5 - B_6.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения ($M_1 = -1$; $M_2 = 1$; $M_3 = -1$, $M_4 = -1$; $M_5 = -1$ и $M_6 = -1$), в сводную таблицу (таблица №2).

Таблица №2

Составляющее звено размерной цепи (B_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO) _i	Нижнее отклонение (HO) _i
B_1	-2	+0,05	-0,05
B_2	112	+0,12	-0,12
B_3	-23	+0,12	0
B_4	-60	+0,2	0
B_5	-23	+0,12	0
B_6	-4	+0,05	0

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$B_{\Sigma} = \sum M_i B_i = 0; (BO)_{\Sigma} = \sum (BO)_i = +0,66;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \sum (HO)_i = -0,17 \text{ и окончательно } B_{\Sigma} = 0^{+0,66}_{-0,17}.$$

То есть полная взаимозаменяемость не обеспечена.

Обеспечим требуемый зазор между компенсирующим и упорным кольцами приемом пригонки (подшлифовки) компенсирующего кольца (не полная взаимозаменяемость).

Размер такого компенсирующего кольца определим расчетом размерной цепи, составляющими звеньями которой являются: B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 – прежние, ($B_7 = 0^{+0,15}_{+0,05}$) – зазор между компенсирующим и упорным кольцами (см. рис.2).

Рис. 2
остальное см. рис. 1

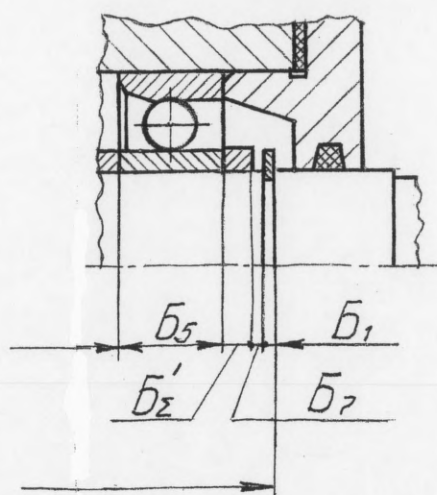
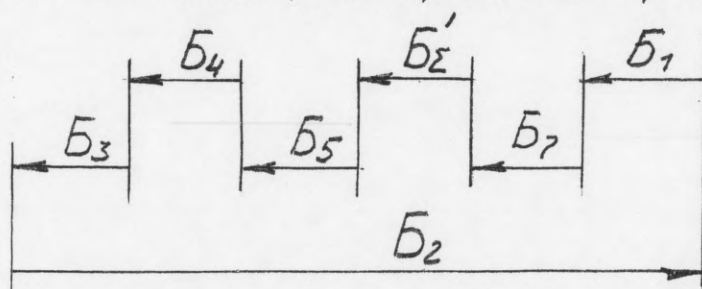


Схема
размерной
цепи B_{Σ}' .

Строим линейную размерную цепь для расчета размера компенсирующего кольца и ее уравнение.



$$B_{\Sigma}' = -B_1 + B_2 - B_3 - B_4 - B_5 - B_7.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения ($M_1 = -1, M_2 = 1, M_3 = -1, M_4 = -1, M_5 = -1$ и $M_7 = -1$), в сводную таблицу (таблица N3).

Таблица N3

Составляющее звено размерной цепи (B_i)	Размер	Верхнее отклонение ($BD)_i$	Нижнее отклонение ($HO)_i$
B_1	-2	+0,05	-0,05
B_2	112	+0,12	-0,12
B_3	-23	+0,12	0
B_4	-60	+0,2	0
B_5	-23	+0,12	0
B_7	0	-0,05	-0,15

Определяем характеристики замыкающего звена.

$$B'_\Sigma = \sum M_i B_i = 4; (BO)_\Sigma = \sum (BO)_i = +0,56;$$

$$(HO)_\Sigma = \sum (HO)_i = -0,32 \text{ и окончательно } B'_\Sigma = 4^{+0,56}_{-0,32}.$$

Итак, размер компенсирующего кольца, обеспечивающего путем подгонки (подшлифовки) необходимый зазор между компенсирующим и упорным кольцами в узле редуктора, определяем путем сложения номинального размера замыкающего звена B'_Σ с его положительным верхним отклонением и с абсолютной величиной допуска на изготовление кольца, если последний обращен в его тело:

$$B'_6 = 4 + 0,56 + 0,05 = 4,61 - 0,05.$$

Показанный выше расчет получения необходимого зазора в узле редуктора с помощью подгонки (шлифовки) компенсирующего кольца приемлем в индивидуальном и мелкосерийном производствах.

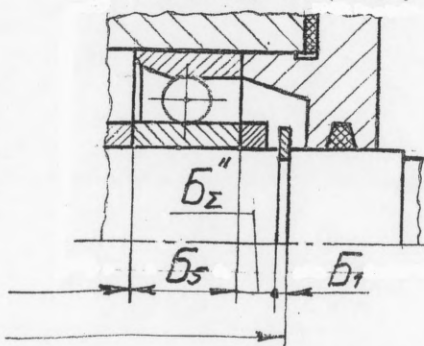
В крупносерийном производстве применяется метод подбора или селективной сборки.

Далее приводится расчет группового исполнения звена-регулятора, в качестве которого служит компенсирующее кольцо (звено B''_6). Из этого группового исполнения подбирается тот типоразмер звена-регулятора, который обеспечивает необходимый зазор в узле редуктора.

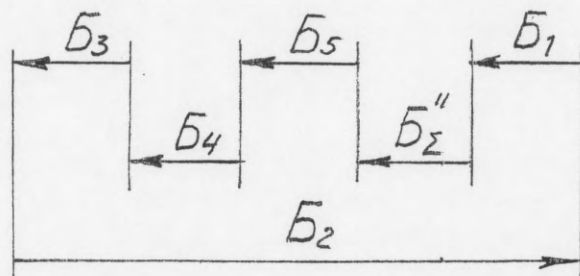
Размер регулирования определим расчетом размерной цепи, составляющие звенья которой B_1, B_2, B_3, B_4 и B_5 - прежние (см. рис. 3).

Схема
размерной
цепи B''_6 .

Рис. 3
остальное см. рис. 1



Строим линейную размерную цепь для расчета размера регулирования и ее уравнение.



$$B_{\Sigma}'' = -B_1 + B_2 - B_3 - B_4 - B_5.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения ($M_1 = -1, M_2 = 1, M_3 = -1, M_4 = -1$ и $M_5 = -1$), в сводную таблицу (таблица №4).

Таблица №4

Составляющее звено размерной цепи (B_i)	Размер	Верхнее отклонение ($(BO)_i$)	Нижнее отклонение ($(HO)_i$)
B_1	-2	+0,05	-0,05
B_2	112	+0,12	-0,12
B_3	-23	+0,12	0
B_4	-60	+0,2	0
B_5	-23	+0,12	0

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$B_{\Sigma}'' = \sum M_i B_i = 4; (BO)_{\Sigma} = \sum (BO)_i = +0,61;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \sum (HO)_i = -0,17 \text{ и окончательно } B_{\Sigma}'' = 4^{+0,61}_{-0,17}.$$

Итак, максимальный размер звена-регулятора -

$$B_{\Sigma}''_{\max} = B_{\Sigma}''_{\max} - 0,05 = 4,61 - 0,05 = 4,56;$$

минимальный размер звена-регулятора -

$$B_{\Sigma}''_{\min} = B_{\Sigma}''_{\min} - 0,05 = 3,83 - 0,05 = 3,78; \text{ где } 0,05 -$$

- минимальный зазор в узле редуктора.

Поле допуска размера звена-регулятора определим из формулы: $2\delta_p = B_{\Sigma}''_{\max} - B_{\Sigma}''_{\min} = 4,56 - 3,78 = 0,78.$

Количество ступеней (исполнений) звена-регулятора определим из формулы: $K_p = 1 + \frac{2\delta_p}{2\delta_3} = 1 + \frac{0,78}{0,10} = 9,$ где

2бз – поле допуска зазора в узле редуктора (зазора между компенсирующим и упорным кольцами).

Принимая за первую ступень звена-регулятора B_6^{min} имеем следующий ряд исполнений звена $B_6^{\text{''}}$:

$$B_6^{\text{''(1)}} = 3,78 - 0,05, B_6^{\text{''(2)}} = 3,88 - 0,05, B_6^{\text{''(3)}} = 3,98 - 0,05, B_6^{\text{''(4)}} = 4,08 - 0,05, \\ B_6^{\text{''(5)}} = 4,18 - 0,05, B_6^{\text{''(6)}} = 4,28 - 0,05, B_6^{\text{''(7)}} = 4,38 - 0,05, B_6^{\text{''(8)}} = 4,48 - 0,05, \\ B_6^{\text{''(9)}} = 4,56 - 0,05.$$

Выполним эту же задачу обеспечения нужных зазоров в узле редуктора расчетом размерных цепей вероятностным методом, учитывающим как рассеивание размеров так и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев.

Убедимся, что этот метод расчета наиболее полно удовлетворяет минимизации затрат на изготовление деталей и машины в целом по сравнению с методом на „максимум-минимум“.

Начнем проверки взаимозаменяемости узла редуктора при принятых допусках размеров составляющих звеньев.

Воспользуемся для этого размерной цепью на Рис.1.

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №5). Выполнив вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №5

Составляющее звено размерной цепи (B_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO)	Нижнее отклонение (НО)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
B_1	-2	+0,05	-0,05	0	0,05	0,0025
B_2	112	+0,12	-0,12	0	0,12	0,0144
B_3	-23	+0,12	0	+0,06	0,06	0,0036
B_4	-60	+0,2	0	+0,10	0,10	0,01
B_5	-23	+0,12	0	+0,06	0,06	0,0036
B_6	-4	+0,05	0	+0,025	0,025	0,000625

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$B_{\Sigma} = \sum M_i B_i = 0; \alpha_{\Sigma} = \sum \alpha_i = 0,245; \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum \delta_i^2} = 0,186;$$

$$(BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = 0,245 + 0,186 = 0,43;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = 0,245 - 0,186 = 0,06 \text{ и}$$

$$\text{окончательно } B_{\Sigma} = 0^{+0,43}_{-0,06}.$$

То есть „полная“ взаимозаменяемость не обеспечена.

Требуемый зазор между компенсирующим и упорным кольцами обеспечим приемом пригонки (подшлифовки) компенсирующего кольца. Для расчета размера такого компенсирующего кольца воспользуемся размерной цепью на Рис. 2.

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №6). Выполнив вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №6

Составляющее звено размерной цепи (B_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO)	Нижнее отклонение (HO)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
B_1	-2	+0,05	-0,05	0	0,05	0,0025
B_2	112	+0,12	-0,12	0	0,12	0,0144
B_3	-23	+0,12	0	+0,06	0,06	0,0036
B_4	-60	+0,2	0	+0,10	0,10	0,01
B_5	-23	+0,12	0	+0,06	0,06	0,0036
B_7	0	-0,05	-0,15	-0,10	0,05	0,0025

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$B'_{\Sigma} = \sum M_i B_i = 4; \alpha_{\Sigma} = \sum \alpha_i = 0,12; \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum \delta_i^2} = 0,19;$$

$$(BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = 0,12 + 0,19 = 0,31;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = 0,12 - 0,19 = -0,07 \text{ и}$$

$$\text{окончательно } B'_{\Sigma} = 4^{+0,31}_{-0,07}.$$

Итак, размер компенсирующего кольца, обеспечивающего путем подгонки необходимый зазор в узле редуктора, определяем сложением номинального размера замыкающего звена B'_Σ с его положительным верхним отклонением и абсолютной величиной допуска на изготовление кольца, если последний обращен в его тело:

$$B'_\Sigma = 4 + 0,31 + 0,05 = 4,36 - 0,05.$$

Далее выполним расчет группового исполнения звена-регулятора, в качестве которого служит компенсирующее кольцо (звено B''_6) вероятностным методом.

Расчет начнем с определения размера регулирования. Для этого воспользуемся размерной цепью на Рис. 3.

Перенесем размеры составляющих звеньев, с учетом передаточных отношений, в сводную таблицу (таблица №7). Выполнив вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №7

Составляющее звено размерной цепи (B_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO)	Нижнее отклонение (HO)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
B_1	-2	+0,05	-0,05	0	0,05	0,0025
B_2	112	+0,12	-0,12	0	0,12	0,0144
B_3	-23	+0,12	0	+0,06	0,06	0,0036
B_4	-60	+0,2	0	+0,10	0,10	0,01
B_5	-23	+0,12	0	+0,06	0,06	0,0036

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$B''_\Sigma = \sum M_i B_i = 4; \alpha_\Sigma = \sum \alpha_i = 0,22; \delta_\Sigma = \sqrt{\sum \delta_i^2} = 0,18;$$

$$(BO)_\Sigma = \alpha_\Sigma + \delta_\Sigma = 0,22 + 0,18 = 0,40;$$

$$(HO)_\Sigma = \alpha_\Sigma - \delta_\Sigma = 0,22 - 0,18 = 0,04 \text{ и}$$

$$\text{окончательно } B''_\Sigma = 4^{+0,40}_{+0,04}.$$

Итак, максимальный размер звена-регулятора -

$$B''_{6\max} = B''_{\Sigma\max} - 0,05 = 4,40 - 0,05 = 4,35;$$

минимальный размер звена-регулятора –
 $B_6''_{\min} = B_6'' - 0,05 = 4,04 - 0,05 = 3,99$, где $0,05$ –
 – минимальный зазор в узле редуктора.

Поле допуска размера звена-регулятора определим из формулы $2\delta_p = B_6''_{\max} - B_6''_{\min} = 4,35 - 3,99 = 0,36$.

Количество ступеней (исполнений) звена-регулятора определим из формулы: $N_p = 1 + \frac{2\delta_p}{2\delta_3} = 1 + \frac{0,36}{0,10} = 5$, где $2\delta_3$ – поле допуска зазора в узле редуктора.

Принимая за первую ступень звена-регулятора $B_6''_{\min}$, имеем следующий ряд исполнений звена B_6'' :

$$B_6''^{(1)} = 3,99 - 0,05; B_6''^{(2)} = 4,09 - 0,05; B_6''^{(3)} = 4,19 - 0,05; B_6''^{(4)} = 4,29 - 0,05; B_6''^{(5)} = 4,35 - 0,05.$$

Таким образом вероятностный метод расчета позволил сократить количество исполнений звена-регулятора почти в два раза.

ПРИМЕР 2.

Расчет суммарного осевого зазора между шестерней и втулками насоса.

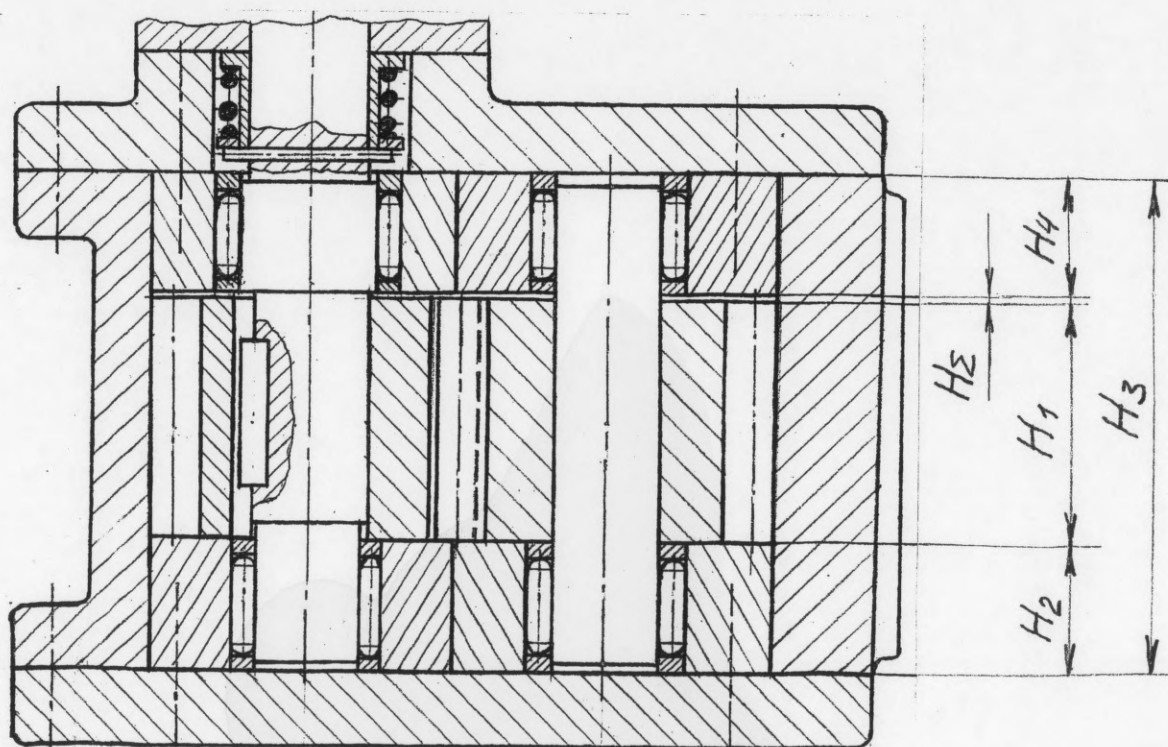


Схема размерной цепи H .

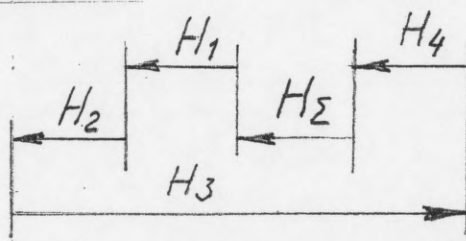
В собранном шестеренчатом насосе должен обеспечиваться суммарный осевой зазор между шестерней и втулками в пределах $0,06 \dots 0,1$ мм (замыкающее звено H_Σ).

Выполним расчет размерной цепи, составляющими звеньями которой являются: H_1 – высота шестерни; H_2 – высота втулки; H_3 – высота корпуса; H_4 – высота втулки.

Таблица N1

Составляющее звено	H_1	H_2	H_3	H_4
Размер и допустимые отклонения	$45 \begin{smallmatrix} -0,010 \\ -0,027 \end{smallmatrix}$	$31,5 \begin{smallmatrix} -0,010 \\ -0,027 \end{smallmatrix}$	$108 \begin{smallmatrix} +0,05 \\ +0,03 \end{smallmatrix}$	$31,5 \begin{smallmatrix} -0,010 \\ -0,027 \end{smallmatrix}$

Строим линейную размерную цепь для расчета суммарного осевого зазора между шестерней и втулками и ее уравнение.



$$H_\Sigma = -H_1 - H_2 + H_3 - H_4.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения ($M_1 = -1, M_2 = -1, M_3 = 1, M_4 = -1$), в сводную таблицу (таблица N2).

Таблица N2

Составляющее звено размерной цепи (H_i)	Размер	Верхнее отклонение $(BO)_i$	Нижнее отклонение $(HO)_i$
H_1	-45	+0,027	+0,010
H_2	-31,5	+0,027	+0,010
H_3	108	+0,05	+0,03
H_4	-31,5	+0,027	+0,010

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$H_\Sigma = \sum M_i H_i = 0; (BO)_\Sigma = \sum (BO)_i = 0,131;$$

$$(H0)_\Sigma = \sum (H0)_i = 0,06 \text{ и окончательно } H_\Sigma = 0^{+0,131}_{+0,060}.$$

То есть полная взаимозаменяемость не обеспечена, поэтому обратимся к приему селективной сборки, а именно: способу распределения допусков размеров звеньев на группы и комплектование групп деталей для сборки. Распределим допуски размеров звеньев на две группы: первая – звенья, размеры которых имеют распределенные допуски:

$H_1^{(1)} = 45^{-0,010}_{-0,016}$; $H_2^{(1)} = 31,5^{-0,010}_{-0,016}$; $H_3^{(1)} = 108^{+0,04}_{+0,03}$ и $H_4^{(1)} = 31,5^{-0,010}_{-0,016}$; вторая – штатные звенья: H_1 , H_2 , H_3 и H_4 .

Простатриваются четыре комбинации комплектования этих деталей на сборку, в результате которой суммарный осевой зазор между шестерней и втулками не превысит допустимых пределов: комплект №1 (таблица №3); комплект №2 (таблица №4); комплект №3 (таблица №5) и комплект №4 (таблица №6).

Таблица №3

Составляющее звено	$H_1^{(1)}$	$H_2^{(1)}$	$H_3^{(1)}$	H_4
Размер и допускаемые отклонения	$45^{-0,010}_{-0,016}$	$31,5^{-0,010}_{-0,016}$	$108^{+0,04}_{+0,03}$	$31,5^{-0,010}_{-0,027}$

Таблица №4

Составляющее звено	H_1	$H_2^{(1)}$	$H_3^{(1)}$	$H_4^{(1)}$
Размер и допускаемые отклонения	$45^{-0,010}_{-0,027}$	$31,5^{-0,010}_{-0,016}$	$108^{+0,04}_{+0,03}$	$31,5^{-0,010}_{-0,016}$

Таблица №5

Составляющее звено	$H_1^{(1)}$	H_2	$H_3^{(1)}$	$H_4^{(1)}$
Размер и допускаемые отклонения	$45^{-0,010}_{-0,016}$	$31,5^{-0,010}_{-0,027}$	$108^{+0,04}_{+0,03}$	$31,5^{-0,010}_{-0,016}$

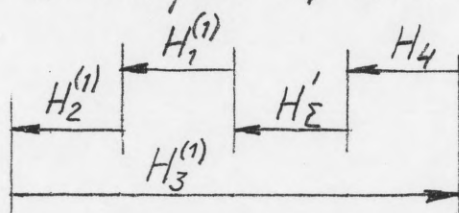
Таблица №6

составляю- щее звено	$H_1^{(1)}$	$H_2^{(1)}$	H_3	$H_4^{(1)}$
Размер и допускаемые отклонения	45 ^{-0,010} _{-0,016}	31,5 ^{-0,010} _{-0,016}	108 ^{+0,05} _{+0,03}	31,5 ^{-0,010} _{-0,016}

Остается проверить соответствие деталей в комплектах требованию сборки насоса.

Выполним такую проверку комплекта №1 расчетом размерной цепи определения суммарного осевого зазора между шестерней и втулками, составляющими звеньями которой являются звенья из таблицы №3.

Строим такую размерную цепь и ее уравнение.



$$H_{\Sigma}' = -H_1^{(1)} - H_2^{(1)} + H_3^{(1)} - H_4.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №7).

Таблица №7

составляю- щее звено размерной цепи (H_i)	Размер	Верхнее отклоне- ние (BO) _i	Нижнее отклоне- ние (НО) _i
$H_1^{(1)}$	-45	+0,016	+0,010
$H_2^{(1)}$	-31,5	+0,016	+0,010
$H_3^{(1)}$	108	+0,04	+0,03
H_4	-31,5	+0,027	+0,010

Определим характеристики замыкающего звена:

$$H_{\Sigma}' = \sum M_i H_i = 0; (BO)_{\Sigma} = \sum (BO)_i = 0,099;$$

$$(НО)_{\Sigma} = \sum (НО)_i = 0,06 \text{ и окончательно } H_{\Sigma}' = 0^{+0,099}_{+0,060}.$$

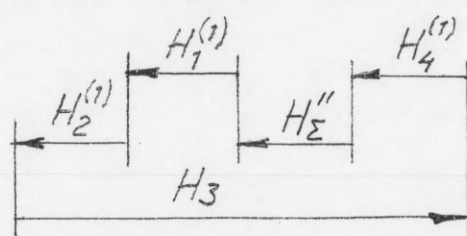
То есть требование сборки насоса выполнено.

Результат проверки комплекта №1 отнесем также на

комплекты №2 и №3, так как легко видеть, что величины их составляющих звеньев и суммарные отклонения одинаковы.

Осталось выполнить проверку комплекта №4 на соответствие деталей в комплекте требованию сборки насоса.

Строим размерную цепь, составляющими звеньями которой являются звенья из таблицы №6, и ее уравнение.



$$H_{\Sigma}'' = -H_1^{(1)} - H_2^{(1)} + H_3 - H_4^{(1)}.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №8).

Таблица №8

Составляющее звено размерной цепи (H_i)	Размер	Верхнее отклонение $(BO)_i$	Нижнее отклонение $(HO)_i$
$H_1^{(1)}$	-45	+0,016	+0,010
$H_2^{(1)}$	-31,5	+0,016	+0,010
H_3	108	+0,05	+0,03
$H_4^{(1)}$	-31,5	+0,016	+0,01

Определим характеристики замыкающего звена:

$$H_{\Sigma}'' = \sum M_i H_i = 0; (BO)_{\Sigma} = \sum (BO)_i = 0,098;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \sum (HO)_i = 0,06 \text{ и окончательно } H_{\Sigma}'' = 0^{+0,098}_{+0,060}.$$

То есть требование сборки насоса выполнено.

ПРИМЕР 3.

Расчет собираемости и качества шпилечного соединения.

Собираемость шпильки в кармане смежного корпуса определяется гарантированным зазором между торцом шпильки и задней стенкой кармана (звено K_{Σ} , см. Схему размерных цепей К и Л). Он подтверждается

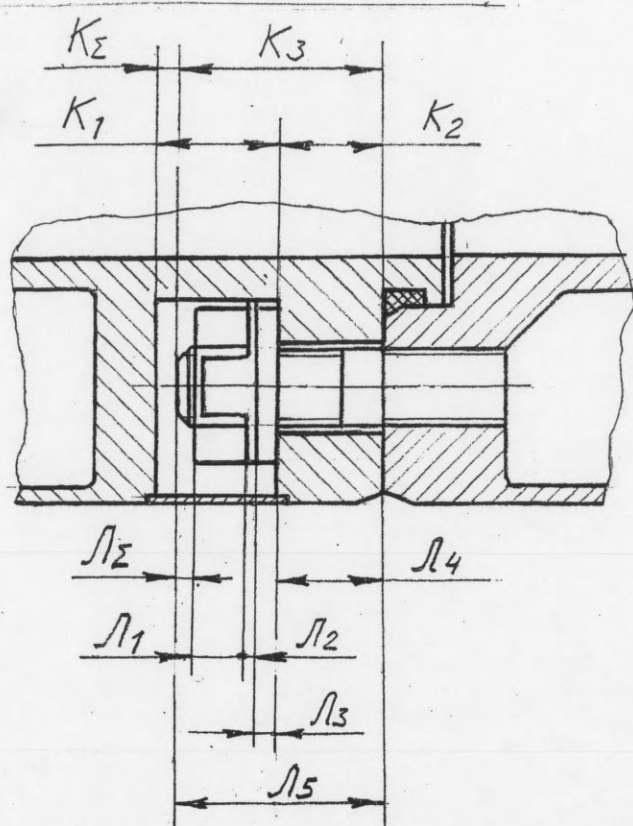
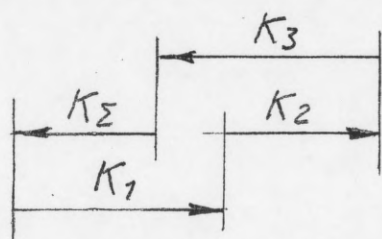


Схема
размерных
цепей Кил.

расчетом размерной цепи, составляющими звеньями которой являются: ($K_1 = 16^{+0,43}$) - ширина кармана; ($K_2 = 12,5 \pm 0,3$) - толщина фланца; ($K_3 = 26,5 \pm 0,5$) - высота выступающей части шпильки.

Строим линейную размерную цепь определения собираемости шпильки в кармане корпуса и ее уравнивание.



$$K_\Sigma = K_1 + K_2 - K_3.$$

Перенесем размеры составляющих, учитывая передаточные отношения ($M_1 = 1$, $M_2 = 1$ и $M_3 = -1$), в сводную таблицу (таблица №1).

Таблица №1

Составляющее звено размерной цепи (K_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO) _i	Нижнее отклонение (HO) _i
K_1	16	+0,43	0
K_2	12,5	+0,3	-0,3
K_3	-26,5	+0,5	-0,5

Определим характеристики замыкающего звена:

$$K_{\Sigma} = \sum M_i \cdot K_i = 2; (BD)_{\Sigma} = \sum (BD)_i = 1,23;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \sum (HO)_i = -0,8 \text{ и окончательно } K_{\Sigma} = 2^{+1,23}_{-0,80}.$$

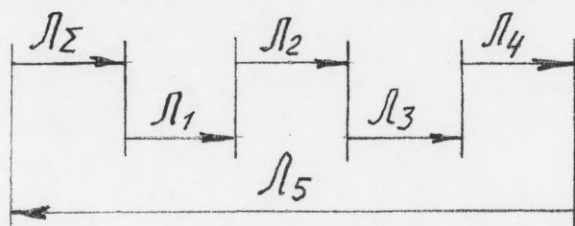
То есть собираемость (взаимозаменяемость) соединения обеспечена.

Выступание шпильки хотя бы на высоту фанки за торцевой гайки характеризует качество крепления шпильчатого соединения. Оно подтверждается расчетом размерной цепи, составляющими звеньями которой являются: L_1 - высота гайки; L_2 - толщина замковой шайбы; L_3 - толщина круглой шайбы; L_4 - толщина фланца корпуса и L_5 - высота выступающей части шпильки.

Таблица №2

Составляющее звено	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
Размер и допускаемые отклонения	$8,5_{-0,36}$	$1 \pm 0,09$	$2 \pm 0,18$	$12,5 \pm 0,3$	$26,5 \pm 0,5$

Строим линейную размерную цепь определения качества соединения и ее уравнение.



$$L_{\Sigma} = -L_1 - L_2 - L_3 - L_4 + L_5.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения ($M_1 = -1, M_2 = -1, M_3 = -1, M_4 = -1, M_5 = 1$), в сводную таблицу (таблица №3). Выполним вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №3

Составляющее звено размерной цепи (L_i)	Размер	Верхнее отклонение (BD)	Нижнее отклонение (HO)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
1	2	3	4	5	6	7
L_1	-8,5	+0,36	0	+0,18	0,18	0,0324

продолжение табл. № 3

1	2	3	4	5	6	7
λ_2	-1	+0,09	-0,09	0	0,09	0,0081
λ_3	-2	+0,18	-0,18	0	0,18	0,0324
λ_4	-12,5	+0,3	-0,3	0	0,3	0,09
λ_5	26,5	+0,5	-0,5	0	0,5	0,25

Определим характеристики замыкающего звена:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n M_i \lambda_i = 2,5; \quad \alpha_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \alpha_i = 0,18; \quad \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} = 0,64;$$

$$(BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = 0,18 + 0,64 = 0,82;$$

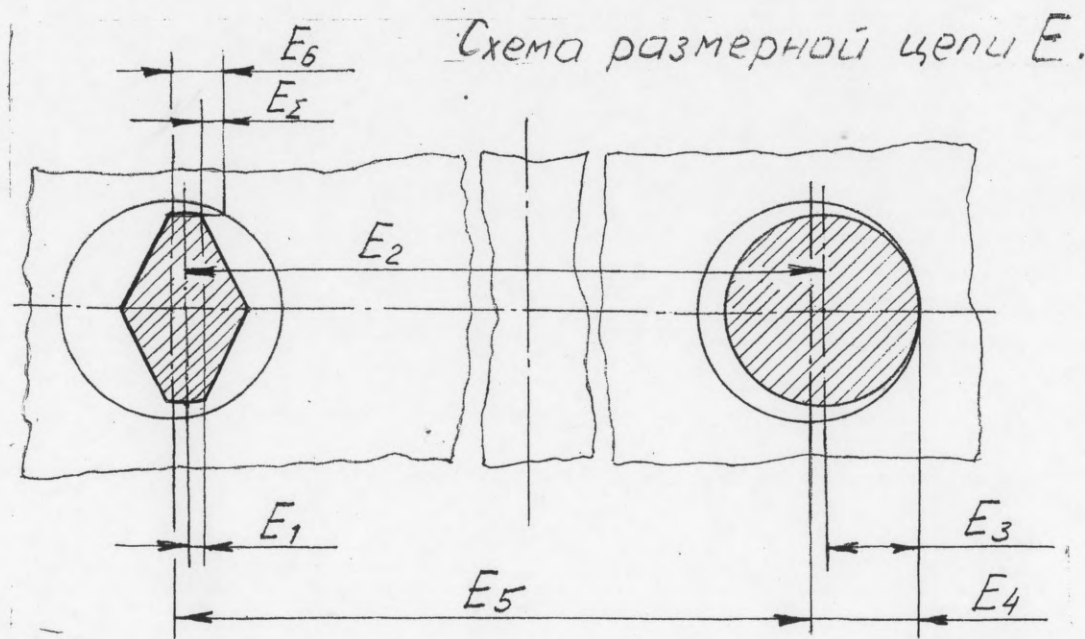
$$(HO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = 0,18 - 0,64 = -0,46 \text{ и}$$

$$\text{окончательно } \lambda_{\Sigma} = 2,5^{+0,82}_{-0,46}.$$

То есть качество шпилечного соединения обеспечено.

ПРИМЕР 4.

Расчет собираемости установочных штифтов одного отсека с ответными отверстиями другого.



По условиям эксплуатации стыковка отсеков так и их растыковка должны производиться вручную. Поэтому в соединении установочных штифтов с ответными отверстиями необходимо присутствие гарантирован-

ного минимального зазора (замыкающее звено E_6).

Составляющими звеньями размерной цепи являются:

E_1 - половина ширины цилиндрического ребра ромбического штифта;

E_2 - межосевое расстояние установочных штифтов;

E_3 - половина диаметра цилиндрического штифта;

E_4 - половина диаметра ответного отверстия;

E_5 - межосевое расстояние ответных отверстий;

E_6 - параметр соединения ромбический штифт - ответное отверстие (расчитываемая величина).

Выполним расчет параметра a (звено E_6) для данного соединения.

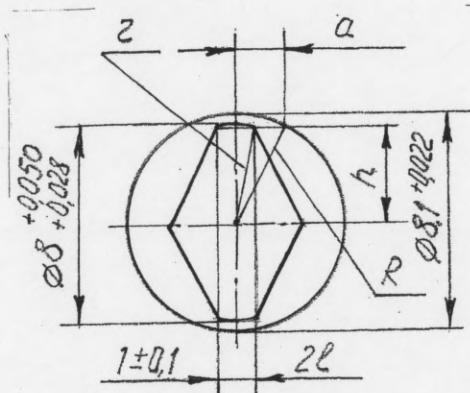


Схема
расчетная;

1. Определим характеристики высоты h :

$$h = \sqrt{z^2 - l^2}, \quad h_{\max} = \sqrt{z_{\max}^2 - l_{\min}^2} = \sqrt{4,025^2 - 0,45^2} = 4,0;$$

$$h_{\min} = \sqrt{z_{\min}^2 - l_{\max}^2} = \sqrt{4,014^2 - 0,55^2} = 3,98; \quad h_{\text{ном}} = \sqrt{z_{\text{ном}}^2 - l_{\text{ном}}^2} = \sqrt{4^2 - 0,5^2} = 3,97 \text{ и окончательно } h = 3,97^{+0,03}_{-0,01}.$$

2. Определим характеристики параметра a (звено E_6):

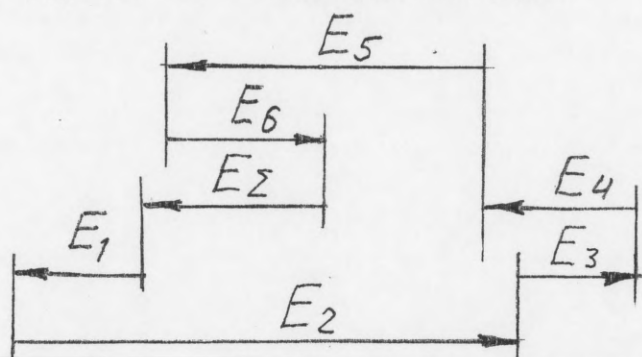
$$a = \sqrt{R^2 - h^2}, \quad a_{\max} = \sqrt{R_{\max}^2 - h_{\min}^2} = \sqrt{4,061^2 - 3,98^2} = 0,81;$$

$$a_{\min} = \sqrt{R_{\min}^2 - h_{\max}^2} = \sqrt{4,05^2 - 4,0^2} = 0,63; \quad a_{\text{ном}} = \sqrt{R_{\text{ном}}^2 - h_{\text{ном}}^2} = \sqrt{4,05^2 - 3,97^2} = 0,80 \text{ и окончательно } a = E_6 = 0,8^{+0,01}_{-0,17}.$$

Таблица № 1

Составляющее звено	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
Размер и допускаемые отклонения	$0,5^{+0,005}$	$554 \pm 0,05$	$4^{+0,025}_{-0,014}$	$4,05^{+0,011}$	$554 \pm 0,05$	$0,8^{+0,01}_{-0,17}$

Строим линейную размерную цепь для расчета собираемости установочных штифтов с ответными отверстиями и ее уравнение.



$$E_{\Sigma} = -E_1 + E_2 + E_3 - E_4 - E_5 + E_6.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения ($M_1 = -1, M_2 = 1, M_3 = 1, M_4 = -1, M_5 = -1, M_6 = 1$), в сводную таблицу (таблица №2). Выполним вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №2

Составляющее звено размерной цепи (E_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO)	Нижнее отклонение (HO)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
E_1	-0,5	+0,05	-0,05	0	0,05	0,0025
E_2	554	+0,05	-0,05	0	0,05	0,0025
E_3	4	+0,025	+0,014	+0,0195	0,0055	0,00003025
E_4	-4,05	0	-0,011	-0,0055	0,0055	0,00003025
E_5	-554	+0,05	-0,05	0	0,05	0,0025
E_6	0,8	+0,01	-0,17	-0,08	0,09	0,0081

Определим характеристики замыкающего звена:

$$E_{\Sigma} = \sum M_i E_i = 0,25; \alpha_{\Sigma} = \sum \alpha_i = -0,066; \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum \delta_i^2} = 0,125;$$

$$(BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = -0,066 + 0,125 = 0,059;$$

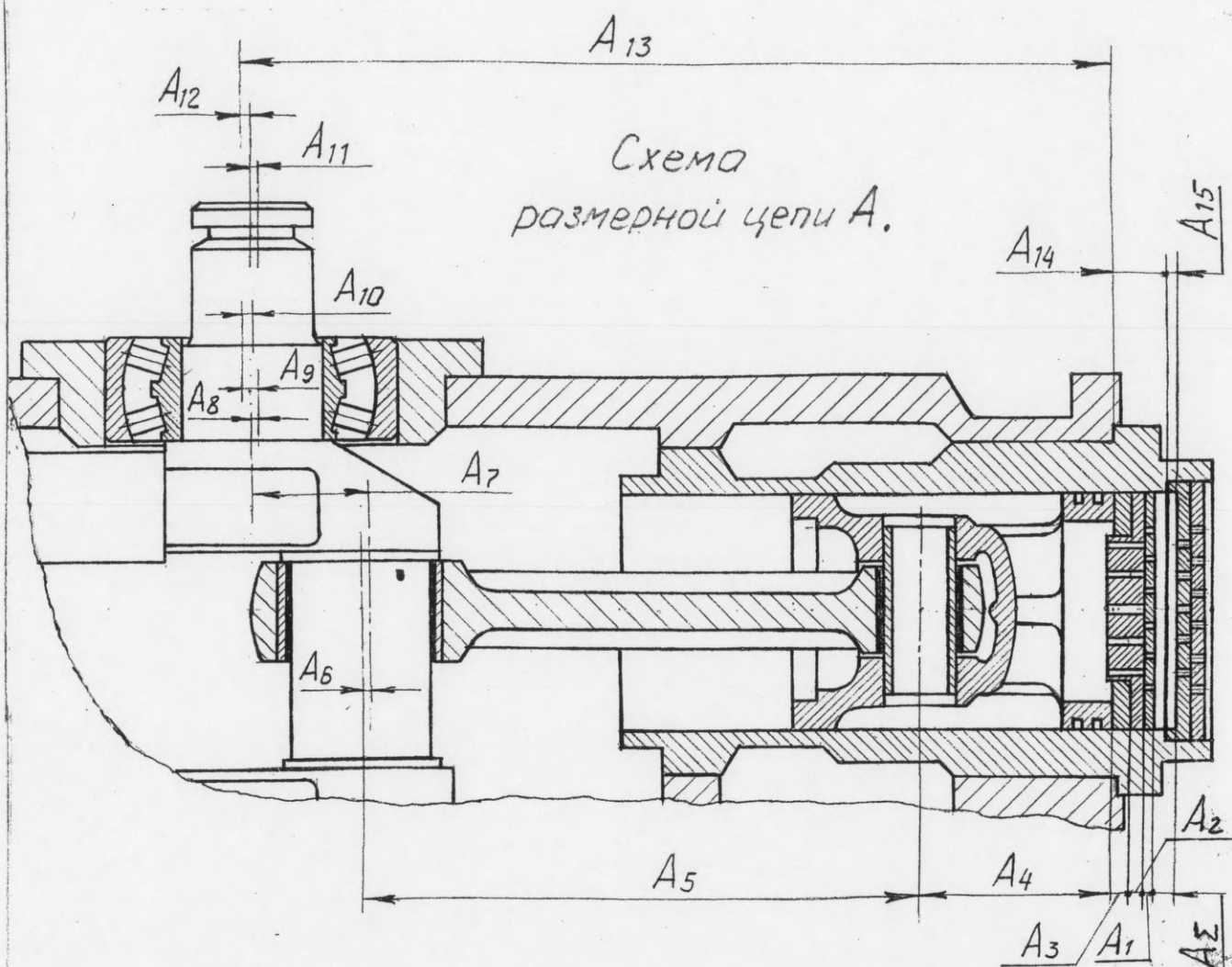
$$(HO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = -0,066 - 0,125 = -0,191 \text{ и}$$

$$\text{окончательно } E_{\Sigma} = 0,25 \begin{smallmatrix} +0,06 \\ -0,20 \end{smallmatrix}.$$

То есть собираемость установочных штифтов и ответных отверстий обеспечена.

ПРИМЕР 5.

Расчет линейного „мертвого“ пространства в цилиндре компрессора.



Для обеспечения расчетной работы компрессора линейное „мертвое“ пространство всего цилиндра должно находиться в пределах $0,5 \dots 1$ мм (закрывающее звено A_{Σ}).

Данный расчет является альтернативным вариантом показанному в методике РТМ23-61, стр.35. При расчете размеры составляющих звеньев и их отклонения взяты аналогичными принятым в варианте „Методики“.

Размерная цепь для расчета линейного „мертвого“ пространства в цилиндре компрессора включает следующие составляющие звенья:

A_1 — толщина розетки всасывающего клапана;

A_2 — толщина седла всасывающего клапана;

- A_3 — толщина прокладки между поршнем и седлом всасывающего клапана;
 A_4 — расстояние от оси отверстия под "палец" в поршне до его верхнего тарца;
 A_5 — расстояние между осями отверстий верхней и нижней головок шатуна;
 A_6 — смещение оси шатунной шейки коленвала относительно оси отверстия в головке шатуна (за счет зазора);
 A_7 — расстояние между осями коренной и шатунной шеек коленвала;
 A_8 — смещение оси дорожки качения внутреннего кольца подшипника относительно оси отверстия;
 A_9 — смещение оси наружного диаметра подшипника относительно оси дорожки качения;
 A_{10} — смещение оси внутреннего диаметра стакана подшипника относительно наружного диаметра подшипника (за счет зазора);
 A_{11} — смещение оси наружного диаметра стакана подшипника относительно оси внутреннего диаметра;
 A_{12} — смещение оси расточки под стаканы подшипников в корпусе относительно оси наружного диаметра стакана (за счет зазора);
 A_{13} — расстояние от привалочной плоскости до оси расточек под стаканы подшипников в корпусе;
 A_{14} — расстояние между торцовыми поверхностями в гильзе;
 A_{15} — глубина расточки в седле нагнетательного клапана.

Таблица №1

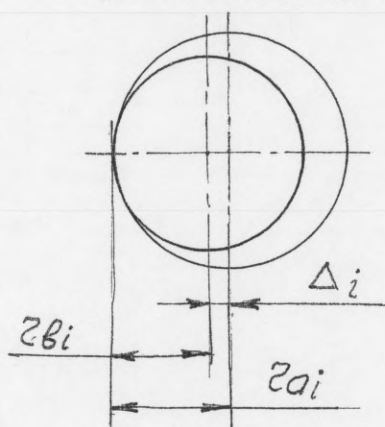
составляющее звено	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
Размеры и допускаемые отклонения	$11_{-0,05}$	$9,5_{-0,03}$	$0,5_{-0,05}$	$133_{-0,1}$	$380 \pm 0,01$	$\frac{\phi 100^{+0,035}}{\phi 100_{-0,075}}$	$65 \pm 0,05$	$\pm 0,006$

продолжение табл. №1

Составляющее звено	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}
Размер и допускаемые отклонения	$\pm 0,0125$	$\frac{\phi 190^{+0,045}}{\phi 190^{-0,038}}$	$\pm 0,006$	$\frac{\phi 255^{+0,045}}{\phi 255^{-0,030}}$	$580_{-0,14}$	$19_{-0,1}$	$0,7^{+0,1}$

Определим линейные размеры составляющих звеньев A_6 , A_{10} и A_{12} в зависимости от зазора в соединении. Для этого выполним вспомогательный расчет.

Схема расчета



$\Delta i = z_{a_i} - z_{b_i}$, где: Δi - линейный размер рассматриваемого звена; z_{a_i} - половина диаметра отверстия рассматриваемого соединения; z_{b_i} - половина диаметра вала рассматриваемого соединения.

- $\Delta_1 = A_6$; $z_{a_1} = 50^{+0,0175}$, $z_{b_1} = 50_{-0,0375}^{-0,0200}$. $\Delta_{1 \max} = z_{a_1 \max} - z_{b_1 \min} = 50,0175 - 49,9625 = 0,055$. $\Delta_{1 \min} = z_{a_1 \min} - z_{b_1 \max} = 50 - 49,98 = 0,02$. Тогда $\Delta_1 = A_6 = 0_{+0,020}^{+0,055}$.
- $\Delta_2 = A_{10}$, $z_{a_2} = 95^{+0,0225}$, $z_{b_2} = 95_{-0,019}^{+0,040}$. $\Delta_{2 \max} = z_{a_2 \max} - z_{b_2 \min} = 95,0225 - 94,981 = 0,0415$. $\Delta_{2 \min} = z_{a_2 \min} - z_{b_2 \max} = 95 - 95,04 = -0,04$. И $\Delta_2 = A_{10} = 0_{-0,0400}^{+0,0415}$.
- $\Delta_3 = A_{12}$, $z_{a_3} = 127,5^{+0,0225}$, $z_{b_3} = 127,5_{-0,015}$. $\Delta_{3 \max} = z_{a_3 \max} - z_{b_3 \min} = 127,5225 - 127,485 = 0,0375$. $\Delta_{3 \min} = 0$. Тогда $\Delta_3 = A_{12} = 0_{+0,0375}$.

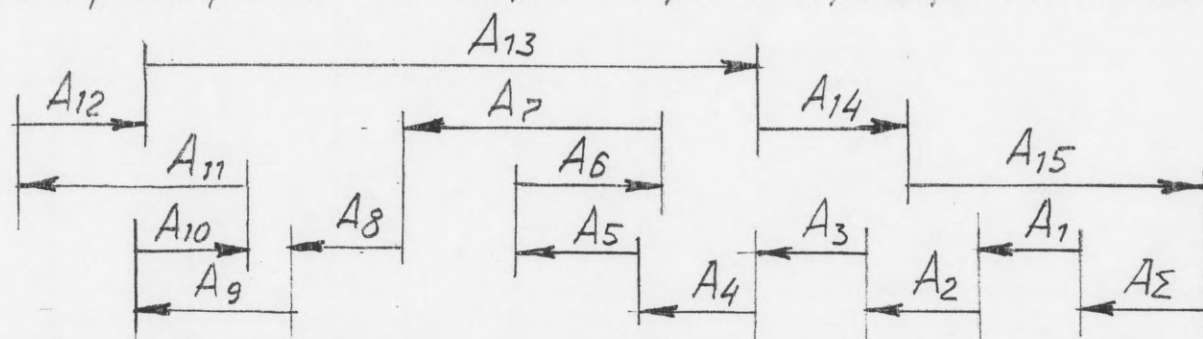
Таблица №2

Составляющее звено	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
Размер и допускаемое отклонение	$11_{-0,05}$	$9,5_{-0,03}$	$0,5_{-0,05}$	$133_{-0,1}$	$380_{\pm 0,01}$	$\frac{0^{+0,055}}{0_{+0,020}}$	$65_{\pm 0,05}$	$\pm 0,006$

продолжение табл. №2

Составляющее звено	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}
Размер и допускаемое отклонение	$\pm 0,0125$	$\frac{0^{+0,0415}}{0_{-0,0400}}$	$\pm 0,006$	$0_{+0,0375}$	$580_{-0,14}$	$19_{-0,1}$	$0,7^{+0,1}$

Строим линейную размерную цепь для расчета „мертвого“ пространства в цилиндре компрессора и ее уравнение.



$$A_{\Sigma} = -A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - A_5 + A_6 - A_7 - A_8 - A_9 + A_{10} - A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14} + A_{15}$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №3). Выполним вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №3

Составляющее звено размерной цепи (A_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO)	Нижнее отклонение (НО)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
A_1	-11	+0,050	0	0,025	0,025	0,000625
A_2	-9,5	+0,030	0	0,015	0,015	0,000225
A_3	-0,5	+0,050	0	0,025	0,025	0,000625
A_4	-133	+0,100	0	0,050	0,050	0,0025
A_5	-380	+0,010	-0,010	0	0,010	0,0001
A_6	0	+0,055	+0,020	0,0375	0,0175	0,00030625
A_7	-65	+0,050	-0,050	0	0,050	0,0025
A_8	0	+0,006	-0,006	0	0,006	0,000036
A_9	0	+0,0125	-0,0125	0	0,0125	0,00015625
A_{10}	0	+0,0415	-0,0400	0,00075	0,04075	0,001660562
A_{11}	0	+0,006	-0,006	0	0,006	0,000036
A_{12}	0	+0,0375	0	0,01875	0,01875	0,000351562
A_{13}	580	0	-0,140	-0,070	0,070	0,0049
A_{14}	19	0	-0,100	-0,050	0,050	0,0025
A_{15}	0,7	+0,100	0	+0,050	0,050	0,0025

Определим характеристики замыкающего звена:

$$A_{\Sigma} = \sum M_i A_i = 0,7; \alpha_{\Sigma} = \sum \alpha_i = 0,102; \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum \delta_i^2} = 0,138;$$

$$(BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = 0,102 + 0,138 = 0,24;$$

$(H0)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = 0,102 - 0,138 = -0,04$ и
окончательно $A_{\Sigma} = 0,7^{+0,24}_{-0,04}$. Это соответствует техусловиям.

ПРИМЕР 6.

Проверка собираемости меж-
отсечного соединения.

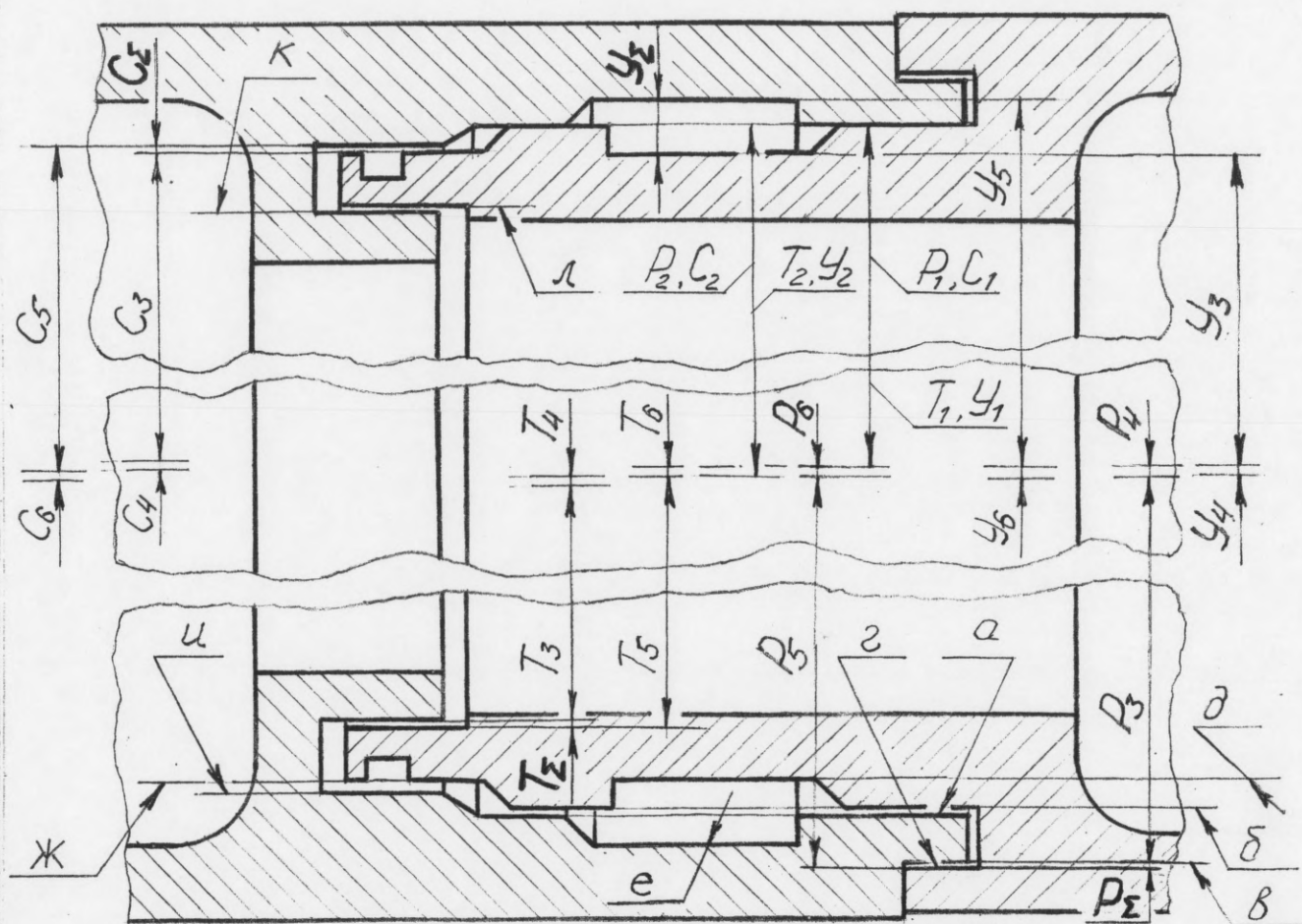


Схема размерных цепей P, C, T, U

Данное межотсечное соединение сочленяется одновременно по четырем цилиндрическим поверхностям. При этом должно обеспечиваться вхождение клина повсему периметру по высоте. Клин - силовой элемент, размещающийся в кольцевом канале собранных отсеков, и фиксирующий их в этом состоянии.

Проверка собираемости выполняется расчетом размерных цепей при следующем условии: зазор в соединении поверхностей a и b выбран полностью. Остающиеся при этом зазоры в проверяемых соединениях (замыкающие звенья P_{Σ}, C_{Σ} и T_{Σ}), а также высота окна под клин (замыкающее звено U_{Σ}) определяют собирае-

мость данного соединения.

Вспомогательную роль в собираемости межотсечного соединения выполняет гарантированный минимальный зазор в соединении поверхностей а и б.

Итак, размерная цепь, решением которой подтверждается собираемость поверхностей в и г межотсечного соединения, включает следующие составляющие звенья:

R_1 - половина диаметра цилиндрической поверхности б;

R_2 - половина диаметра цилиндрической поверхности а;

R_3 - половина диаметра цилиндрической поверхности в

R_4 - отклонение от соосности поверхности в относительно поверхности а;

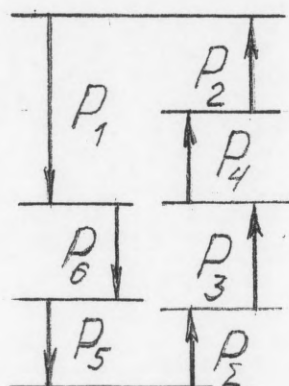
R_5 - половина диаметра цилиндрической поверхности г;

R_6 - отклонение от соосности поверхности г относительно поверхности б.

Таблица N 1

Составляющее звено	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
Размер и допустимое отклонение	$\frac{1}{2}(\phi 500 \begin{smallmatrix} -0,068 \\ -0,223 \end{smallmatrix})$	$\frac{1}{2}(\phi 500 \begin{smallmatrix} +0,155 \\ \end{smallmatrix})$	$\frac{1}{2}(\phi 507 \begin{smallmatrix} -0,230 \\ -0,385 \end{smallmatrix})$	$\pm 0,025$	$\frac{1}{2}(\phi 507 \begin{smallmatrix} +0,155 \\ \end{smallmatrix})$	$\pm 0,025$

Строим линейную размерную цепь для расчета собираемости поверхностей в и г и ее уравнение.



$$R_{\Sigma} = R_1 + R_6 + R_5 - R_3 - R_4 - R_2$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу

(таблица №2). Выполнив вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №2

Составляющее звено размерной цепи (P_i)	Размер	Верхнее отклонение (BD)	Нижнее отклонение (HD)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
P_1	250	-0,034	-0,1115	-0,07275	0,03875	0,001501562
P_2	-250	0	-0,0775	-0,03875	0,03875	0,001501562
P_3	-253,5	+0,1925	+0,115	+0,15375	0,03875	0,001501562
P_4	0	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625
P_5	253,5	+0,0775	0	+0,03875	0,03875	0,001501562
P_6	0	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$P_{\Sigma} = \sum_1^n M_i P_i = 0; \quad \alpha_{\Sigma} = \sum_1^n \alpha_i = +0,081; \quad \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_1^n \delta_i^2} = 0,085;$$

$$(BD)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = +0,081 + 0,085 = 0,166;$$

$$(HD)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = +0,081 - 0,085 = -0,004;$$

и окончательно: $P_{\Sigma} = 0^{+0,166}_{-0,004}$. И так, учитывая, что получившийся натяг в соединении поверхностей ψ и δ надежно компенсируется гарантируемым минимальным зазором в соединении поверхностей α и δ , собираемость поверхностей ψ и δ обеспечена.

Следующая размерная цепь, решением которой подтверждается собираемость поверхностей ψ и χ межотсечного соединения, включает следующие составляющие звенья:

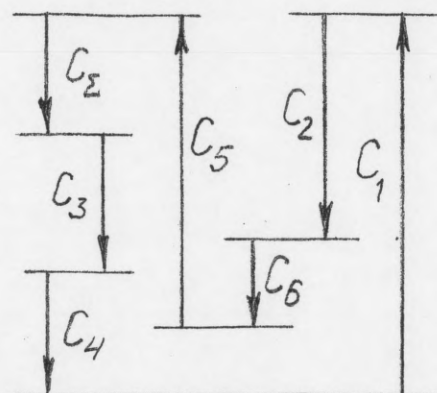
- C_1 - половина диаметра цилиндрической поверхности δ ;
- C_2 - половина диаметра цилиндрической поверхности α ;
- C_3 - половина диаметра цилиндрической поверхности ψ ;
- C_4 - отклонение от плоскостности поверхности ψ относительно поверхности δ ;

C_5 - половина диаметра цилиндрической поверхности \mathcal{U} ;
 C_6 - отклонение от соосности поверхности \mathcal{U} относительно поверхности \mathcal{A} .

Таблица №3

Составляющее звено	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Размер и допускаемое отклонение	$\frac{1}{2}(\phi 500 \begin{smallmatrix} -0,068 \\ -0,223 \end{smallmatrix})$	$\frac{1}{2}(\phi 500 \begin{smallmatrix} +0,155 \\ \end{smallmatrix})$	$\frac{1}{2}(\phi 496 \begin{smallmatrix} -0,230 \\ -0,385 \end{smallmatrix})$	$\pm 0,025$	$\frac{1}{2}(\phi 496 \begin{smallmatrix} +0,155 \\ \end{smallmatrix})$	$\pm 0,025$

Строим линейную размерную цепь для расчета собираемости поверхностей $\mathcal{Ж}$ и \mathcal{U} и ее уравнение.



$$C_{\Sigma} = C_1 - C_2 - C_3 - C_4 + C_5 - C_6.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №4). Выполнив вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №4

Составляющее звено размерной цепи (C_i)	Размер	Верхнее отклонение (BD)	Нижнее отклонение (HD)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
C_1	250	-0,034	-0,1115	-0,07275	0,03875	0,001501562
C_2	-250	0	-0,0775	-0,03875	0,03875	0,001501562
C_3	-248	+0,1925	+0,115	+0,15375	0,03875	0,001501562
C_4	0	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625
C_5	248	+0,0775	0	+0,03875	0,03875	0,001501562
C_6	0	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$C_{\Sigma} = \sum_1^n M_i C_i = 0; \alpha_{\Sigma} = \sum_1^n \alpha_i = +0,081; \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_1^n \delta_i^2} = 0,085;$$

$$(BD)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = +0,081 + 0,085 = 0,166;$$

$$(HD)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = +0,081 - 0,085 = -0,004;$$

и окончательно: $C_{\Sigma} = 0^{+0,166}_{-0,004}$. И так, учитывая, что получившийся натяг в соединении поверхностей Ж и Ц надежно компенсируется гарантированным минимальным зазором в соединении поверхностей А и Б, собираемость поверхностей Ж и Ц обеспечена.

Следующая размерная цепь, решением которой подтверждается собираемость поверхностей К и Л межотсечного соединения, включает следующие составляющие звенья:

T_1 - половина диаметра цилиндрической поверхности Б;

T_2 - половина диаметра цилиндрической поверхности А;

T_3 - половина диаметра цилиндрической поверхности К;

T_4 - отклонение от соосности поверхности К относительно поверхности А;

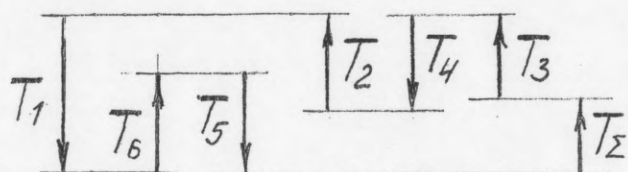
T_5 - половина диаметра цилиндрической поверхности Л;

T_6 - отклонение от соосности поверхности Л относительно поверхности Б.

Таблица № 5

Составляющее звено	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
Размер и допустимое отклонение	$\frac{1}{2}(\phi 500^{+0,058}_{-0,223})$	$\frac{1}{2}(\phi 500^{+0,155}_{-0,223})$	$\frac{1}{2}(\phi 484^{+0,230}_{-0,385})$	$\pm 0,025$	$\frac{1}{2}(\phi 484^{+0,155}_{-0,223})$	$\pm 0,025$

Строим линейную размерную цепь для расчета собираемости поверхностей К и Л и ее уравнение.



$$T_{\Sigma} = T_1 - T_2 - T_3 + T_4 + T_5 - T_6.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица 6). Выполнив вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица 6

Составляющее звено размерной цепи (T_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO)	Нижнее отклонение (HO)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
T_1	250	-0,034	-0,1115	-0,07275	0,03875	0,001501562
T_2	-250	0	-0,0775	-0,03875	0,03875	0,001501562
T_3	-242	+0,1925	+0,115	+0,15375	0,03875	0,001501562
T_4	0	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625
T_5	242	+0,0775	0	+0,03875	0,03875	0,001501562
T_6	0	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$T_{\Sigma} = \sum_i M_i T_i = 0; \alpha_{\Sigma} = \sum_i \alpha_i = +0,081; \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_i \delta_i^2} = 0,085;$$

$$(BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = +0,081 + 0,085 = 0,166;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = +0,081 - 0,085 = -0,004;$$

и окончательно: $T_{\Sigma} = 0 \pm 0,166$. И так, учитывая, что получившийся натяг в соединении поверхностей Кил надежно компенсируется гарантированным минимальным зазором в соединении поверхностей а и б, собираемость поверхностей Кил обеспечена.

Размерная цепь, решением которой подтверждается собираемость клина в кольцевом канале собранных отсеков, включает следующие составляющие звенья:

$У_1$ - половина диаметра цилиндрической поверхности б;

$У_2$ - половина диаметра цилиндрической поверхности а;

$У_3$ - половина диаметра цилиндрической поверхности в;

U_4 - отклонение от соосности поверхности δ относительно поверхности δ ;

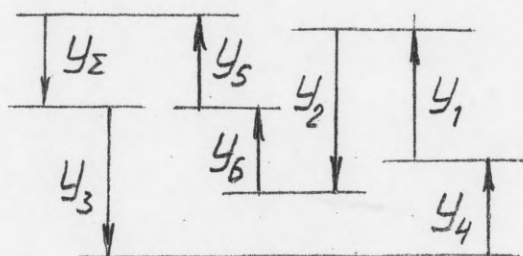
U_5 - половина диаметра цилиндрической поверхности e ;

U_6 - отклонение от соосности поверхности e относительно поверхности a .

Таблица №7

Составляющее звено	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
Размер и допускаемое отклонение	$\frac{1}{2}(\phi 500 \begin{smallmatrix} -0,068 \\ -0,223 \end{smallmatrix})$	$\frac{1}{2}(\phi 500 \begin{smallmatrix} +0,155 \\ \end{smallmatrix})$	$\frac{1}{2}(\phi 496 \begin{smallmatrix} -0,230 \\ -0,385 \end{smallmatrix})$	$\pm 0,025$	$\frac{1}{2}(\phi 504 \begin{smallmatrix} +0,155 \\ \end{smallmatrix})$	$\pm 0,025$

Строим линейную размерную цепь для расчета собираемости клина в кольцевом канале собранных отсеков и ее уравнение.



$$U_{\Sigma} = U_1 - U_2 - U_3 + U_4 + U_5 + U_6.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №8). Выполнив вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №8

Составляющее звено размерной цепи (U_i)	Размер	Верхнее отклонение (ВД)	Нижнее отклонение (НД)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
U_1	250	-0,034	-0,1115	-0,07275	0,03875	0,001501562
U_2	-250	0	-0,0775	-0,03875	0,03875	0,001501562
U_3	-248	+0,1925	+0,115	+0,15375	0,03875	0,001501562
U_4	0	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625
U_5	252	+0,0775	0	+0,03875	0,03875	0,001501562
U_6	0	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$Y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n M_i Y_i = 4; \quad \alpha_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \alpha_i = +0,081; \quad \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} = 0,085;$$

$$(BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = +0,081 + 0,085 = 0,166;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = +0,081 - 0,085 = -0,004;$$

и окончательно: $Y_{\Sigma} = 4^{+0,166}_{-0,004}$.

Размер клина по высоте - $4^{-0,14}_{-0,26}$.

То есть, при максимальном размере клина 3,86 мм и минимальном размере окна 3,996 мм, имеем полную собираемость клина в кольцевом канале собранных отсеков.

Итак, результаты расчета размерных цепей межотсечного соединения дают основание утверждать, что собираемость (взаимозаменяемость) данного соединения обеспечена.

ПРИМЕР 7.

Расчет габаритного размера детали

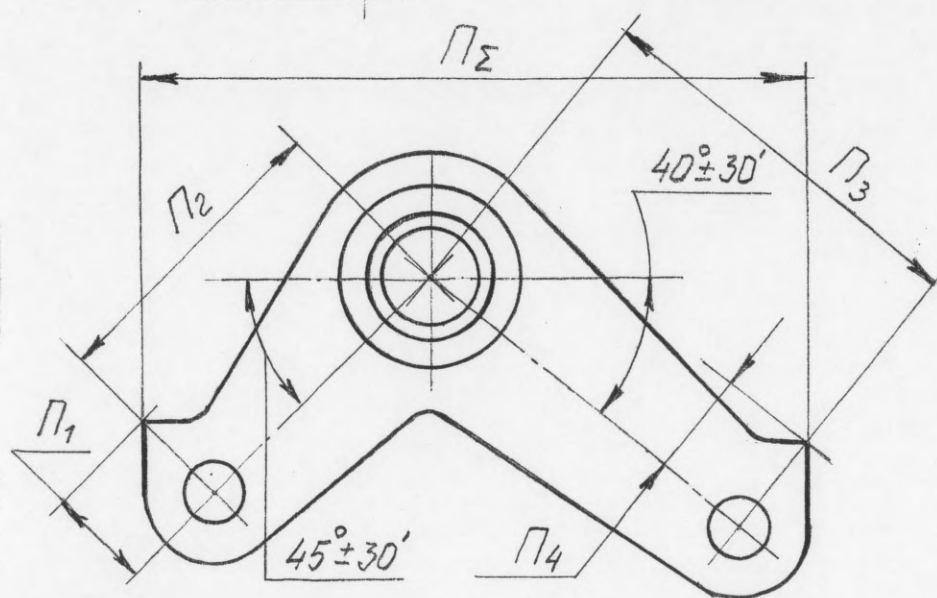
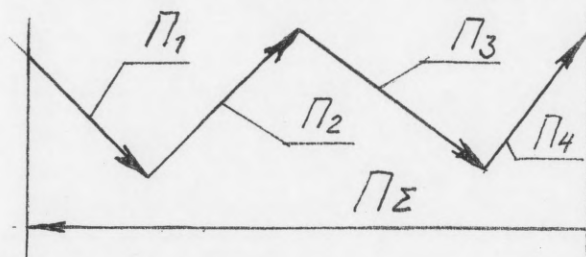


Схема размерной цепи P .

Требуется вычислить габаритный размер детали (P_{Σ}). Составляющие звенья размерной цепи - размеры, связывающие ответственные поверхности детали, не

параллельны между собой, а также не параллельны замыкающему звену: $\Pi_1 = 20^{+0,5}$; $\Pi_2 = 60 \pm 0,25$; $\Pi_3 = 80 \pm 0,25$ и $\Pi_4 = 20^{+0,5}$. То есть имеем плоскостную размерную цепь:



Путем спроектирования непараллельных звеньев на замыкающее звено приводим плоскостную размерную цепь к линейной.

Выполним расчет проекций звеньев Π_1, Π_2, Π_3 и Π_4 на замыкающее звено.

$$\begin{aligned} \text{Пр } \Pi_1 &= (20^{+0,5}) \cdot \cos(45^\circ \pm 30'); \text{ пр } \Pi_{1 \max} = 20,5 \cdot \cos(44^\circ 30') = \\ &= 14,62; \text{ пр } \Pi_{1 \min} = 20 \cdot \cos(45^\circ 30') = 14,02; \text{ пр } \Pi_{1 \text{ ном}} = 20 \cdot \cos 45^\circ = \\ &= 14,14 \text{ и окончательно пр } \Pi_1 = 14,14^{+0,48}_{-0,12}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Пр } \Pi_2 &= (60 \pm 0,25) \cdot \cos(45^\circ \pm 30'); \text{ пр } \Pi_{2 \max} = 60,25 \cdot \cos 44^\circ 30' = 42,97; \\ \text{пр } \Pi_{2 \min} &= 59,75 \cdot \cos 45^\circ 30' = 41,88; \text{ пр } \Pi_{2 \text{ ном}} = 60 \cdot \cos 45^\circ = 42,43 \text{ и} \\ \text{окончательно пр } \Pi_2 &= 42,43^{+0,54}_{-0,55}. \end{aligned}$$

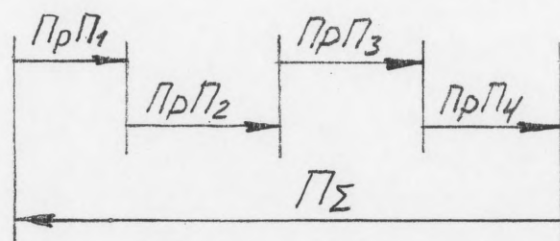
$$\begin{aligned} \text{Пр } \Pi_3 &= (80 \pm 0,25) \cdot \cos(40^\circ \pm 30'); \text{ пр } \Pi_{3 \max} = 80,25 \cdot \cos 39^\circ 30' = 61,92; \\ \text{пр } \Pi_{3 \min} &= 79,75 \cdot \cos 40^\circ 30' = 60,64; \text{ пр } \Pi_{3 \text{ ном}} = 80 \cdot \cos 40^\circ = 61,28 \text{ и} \\ \text{окончательно пр } \Pi_3 &= 61,28 \pm 0,64. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Пр } \Pi_4 &= (20^{+0,5}) \cdot \cos(50^\circ \pm 30'); \text{ пр } \Pi_{4 \max} = 20,5 \cdot \cos 49^\circ 30' = 13,31; \\ \text{пр } \Pi_{4 \min} &= 20 \cdot \cos 50^\circ 30' = 12,72; \text{ пр } \Pi_{4 \text{ ном}} = 20 \cdot \cos 50^\circ = 12,86 \text{ и} \\ \text{окончательно пр } \Pi_4 &= 12,86^{+0,45}_{-0,14}. \end{aligned}$$

Таблица №1.

Составляющее звено	Пр Π_1	Пр Π_2	Пр Π_3	Пр Π_4
Размер и допускаемые отклонения	$14,14^{+0,48}_{-0,12}$	$42,43^{+0,54}_{-0,55}$	$61,28 \pm 0,64$	$12,86^{+0,45}_{-0,14}$

Строим линейную размерную цепь, преобразованную из плоскостной, для расчета габаритного размера детали и ее уравнение.



$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\text{р}\Pi_1} + \Pi_{\text{р}\Pi_2} + \Pi_{\text{р}\Pi_3} + \Pi_{\text{р}\Pi_4}.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев из таблицы №1, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №2).

Таблица №2

Составляющее звено размерной цепи (Π_i)	Размер	Верхнее отклонение (BD_i)	Нижнее отклонение (HO_i)
$\Pi_{\text{р}\Pi_1}$	14,14	+0,48	-0,12
$\Pi_{\text{р}\Pi_2}$	42,43	+0,54	-0,55
$\Pi_{\text{р}\Pi_3}$	61,28	+0,64	-0,64
$\Pi_{\text{р}\Pi_4}$	12,86	+0,45	-0,14

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$\Pi_{\Sigma} = \sum M_i \Pi_i = 130,7; (BD)_{\Sigma} = \sum_7^{\text{II}} (BD_i) = +2,11;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \sum_7^{\text{I}} (HO_i) = -1,45 \text{ и окончательно } \Pi_{\Sigma} = 130,7 \begin{matrix} +2,10 \\ -1,45 \end{matrix}.$$

ПРИМЕР 8.

Расчет минимального размера ответных отверстий одного отсека под шпильки другого, обеспечивающих собираемость отсеков вручную.

Помимо удовлетворения требования по собираемости отсеков (корпусов) вручную установочными штифтами с ответными отверстиями стыкуемых отсеков (Пример 4) необходимо, чтобы этому удовлетворяло соединение шпилек одного отсека с ответными отверстиями другого. При этом отверстия под шпильки должны быть минимального размера, не ослабляющими соединение отсеков.

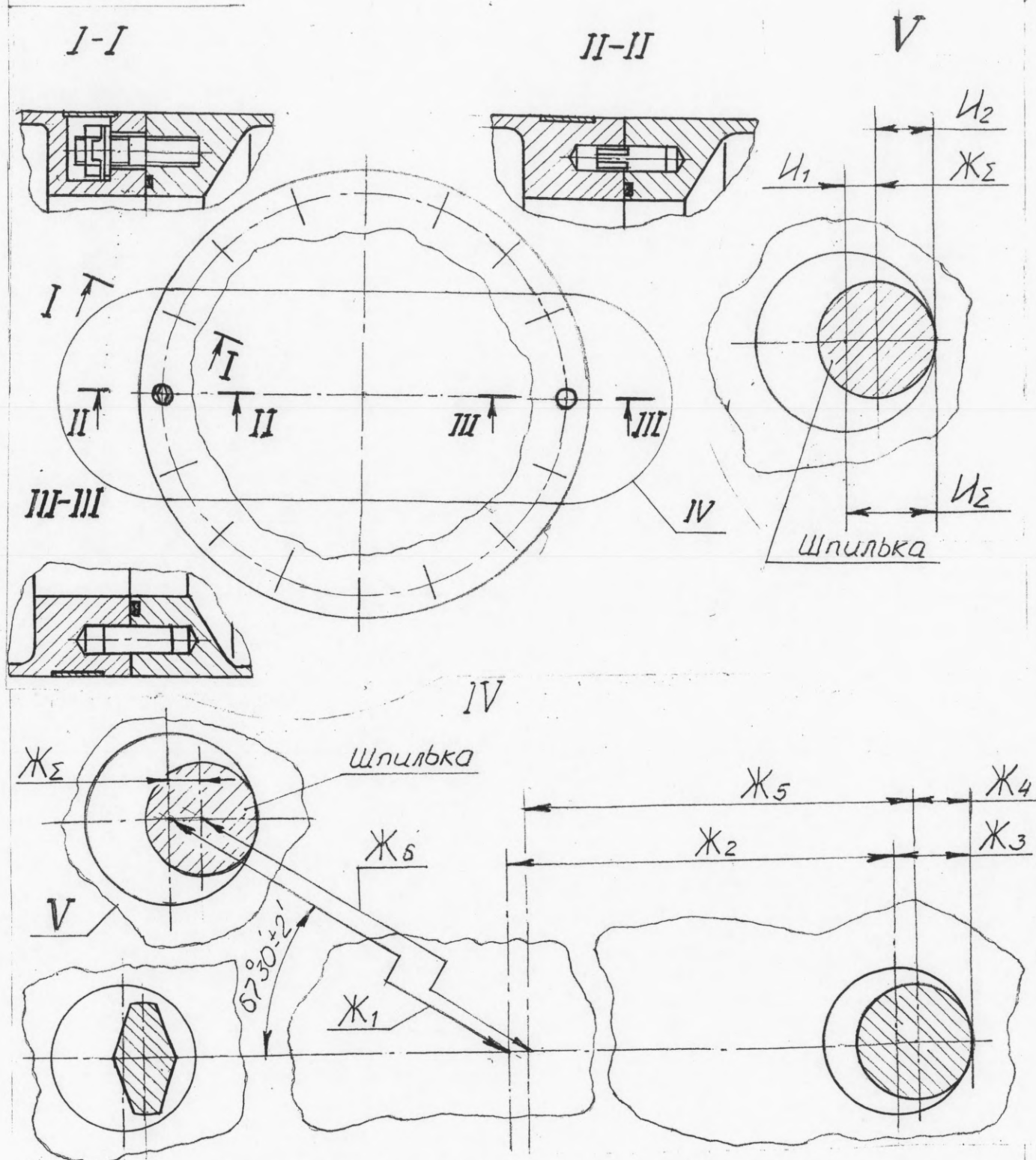


Схема размерных цепей Ж и И.

Для этого требуется рассчитать две размерные цепи. Первая (элемент IV) представляет плоскостную размерную цепь — два составляющих звена $Ж_1$ и $Ж_5$ не параллельны остальным звеньям.

Вторая размерная цепь (элемент V) имеет составляющее звено, которое является замыкающим звеном.

первой размерной цепи.

Итак, составляющими звеньями первой размерной цепи являются:

$Ж_1$ - радиальная координата центра ответного отверстия под шпильку;

$Ж_2$ - половина межосевого расстояния ответных отверстий под штифты;

$Ж_3$ - половина диаметра ответного отверстия под цилиндрический штифт;

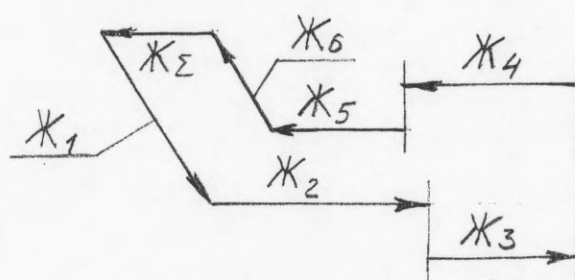
$Ж_4$ - половина диаметра цилиндрического штифта;

$Ж_5$ - половина межосевого расстояния штифтов;

$Ж_6$ - радиальная координата центра шпильки;

Таблица №1

Составляющее звено	$Ж_1$	$Ж_2$	$Ж_3$	$Ж_4$	$Ж_5$	$Ж_6$
Размер и допускаемое отклонение	$277 \pm 0,025$	$277 \pm 0,025$	$4,05^{+0,011}$	$4^{+0,025}_{+0,014}$	$277 \pm 0,025$	$277 \pm 0,025$



Плоскостная
размерная
цепь Ж.

Путем спроектирования непараллельных звеньев замыкающее звено приводим плоскостную размерную цепь к линейной. Угол наклона звеньев $Ж_1$ и $Ж_6$, он же угловая координата оси шпильки (или ответного ей отверстия), принимаем равным $67^\circ 30' \pm 2'$. Легко убедиться - при этом угле имеет место большее поле допуска на отклонение от номинального положения центров шпильки и ответного ей отверстия. При любом другом угле - допуск на отклонение центров шпильки - отверстие будет или равным рассчитанному или меньше. (Это утверждение

справедливо только к рассматриваемому варианту).

Выполним расчет проекций звеньев $Ж_1$ и $Ж_6$ на замыкающее звено ($Ж_Σ$).

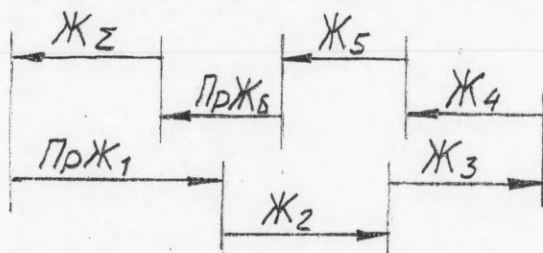
$$\begin{aligned} \text{Пр} Ж_1 &= (277 \pm 0,025) \cdot \cos(67^\circ 30' \pm 2'); \text{пр} Ж_{1, \max} = 277,025 \cdot \cos 67^\circ 28' = 106,156; \\ \text{пр} Ж_{1, \min} &= 276,975 \cdot \cos 67^\circ 32' = 105,86; \\ \text{пр} Ж_{1, \text{ном}} &= 277 \cdot \cos 67^\circ 30' = 106,01; \text{ и окончательно} \\ \text{пр} Ж_1 &= 106,01 \pm 0,15. \end{aligned}$$

$$\text{Очевидно } \text{пр} Ж_6 = \text{пр} Ж_1 = 106,01 \pm 0,15.$$

Таблица №2

Составляющее звено	$\text{Пр} Ж_1$	$Ж_2$	$Ж_3$	$Ж_4$	$Ж_5$	$\text{Пр} Ж_6$
Размер и допускаемое отклонение	$106,01 \pm 0,15$	$277 \pm 0,025$	$4,05^{+0,011}$	$4^{+0,025}_{+0,014}$	$277 \pm 0,025$	$106,01 \pm 0,15$

Строим линейную размерную цепь, преобразованную из плоскостной, для расчета отклонения центров шпилька - отверстие и ее уравнение.



$$Ж_Σ = \text{Пр} Ж_1 + Ж_2 + Ж_3 - Ж_4 - Ж_5 - \text{Пр} Ж_6.$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №3).

Выполнив вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №3

Составляющее звено размерной цепи ($Ж_i$)	Размер	Верхнее отклонение (ВД)	Нижнее отклонение (НД)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
$\text{Пр} Ж_1$	106,01	+0,15	-0,15	0	0,15	0,0225
$Ж_2$	277	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625
$Ж_3$	4,05	+0,011	0	+0,0055	0,0055	0,00003025
$Ж_4$	-4	-0,014	-0,025	-0,0195	0,0055	0,00003025
$Ж_5$	-277	+0,025	-0,025	0	0,025	0,000625
$\text{Пр} Ж_6$	-106,01	+0,15	-0,15	0	0,15	0,0225

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$J_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n M_i J_i = 0,05; \alpha_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \alpha_i = -0,014; \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} = 0,215;$$

$$(BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = -0,014 + 0,215 = 0,20;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = -0,014 - 0,215 = -0,23;$$

и окончательно: $J_{\Sigma} = 0,05^{+0,20}_{-0,23}$.

Итак, имея результат расчета первой размерной цепи, приступаем к расчету второй, составляющими звеньями которой являются (элемент V схемы):

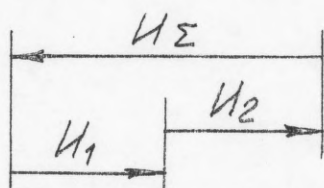
$I_1 (J_{\Sigma})$ — отклонение от номинального положения центров шпильки и ответного отверстия;

I_2 — половина диаметра шпильки.

Таблица №4

Составляющее звено	I_1	I_2
Размер и допускаемое отклонение	$0,05^{+0,20}_{-0,23}$	$5^{-0,075}_{-0,120}$

Строим линейную размерную цепь для расчета размера ответного отверстия под шпильку ее уравнение.



$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2$$

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №5).

Таблица №5

Составляющее звено размерной цепи (I_i)	Размер	Верхнее отклонение (BO_i)	Нижнее отклонение (HO_i)
I_1	0,05	+0,20	-0,23
I_2	5	-0,075	-0,12

Определяем характеристики замыкающего звена;

$$I_{\Sigma} = \sum_1^n M_i I_i = 5,05; (BO)_{\Sigma} = \sum_1^n (BO_i) = +0,125;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \sum_1^n (HO_i) = -0,35; \text{ и окончательно: } I_{\Sigma} = 5,05^{+0,125}_{-0,350}.$$

Для расчета минимального размера ответного отверстия под шпильку максимальный размер замыкающего звена умножим на два и полученный результат округляем до ближайшего нормального числа (округление только в сторону увеличения).

Итак, имеем: $5,175 \times 2 = 10,35$; после округления принимаем диаметр ответного отверстия равным $\phi 10,5$.

ПРИМЕР 9.

Расчет углового отклонения вертикальной плоскости аэродинамических органов управления относительно вертикальной плоскости блока ИСУ.

После сборки за счет технологических ошибок имеет место относительный угловой разворот вертикальных плоскостей аэродинамических органов управления и блока ИСУ (автопилота). Этот разворот не должен превышать $5'$. В противном случае ракете потребуется дополнительная настройка. (Смотри Схему размерной цепи D).

Составляющими звеньями размерной цепи являются:

- D_1 - отклонение вертикальной плоскости блока ИСУ за счет отклонения цилиндрического штифта отсека №4 относительно вертикальной плоскости аэродинамических органов управления;
- D_2 - отклонение вертикальной плоскости блока ИСУ за счет зазора в соединении цилиндрического штифта отсека №4 с ответным отверстием отсека №3;
- D_3 - отклонение вертикальной плоскости блока ИСУ за счет отклонения цилиндрического штифта отсека №3 относительно отверстия под цилиндриче-

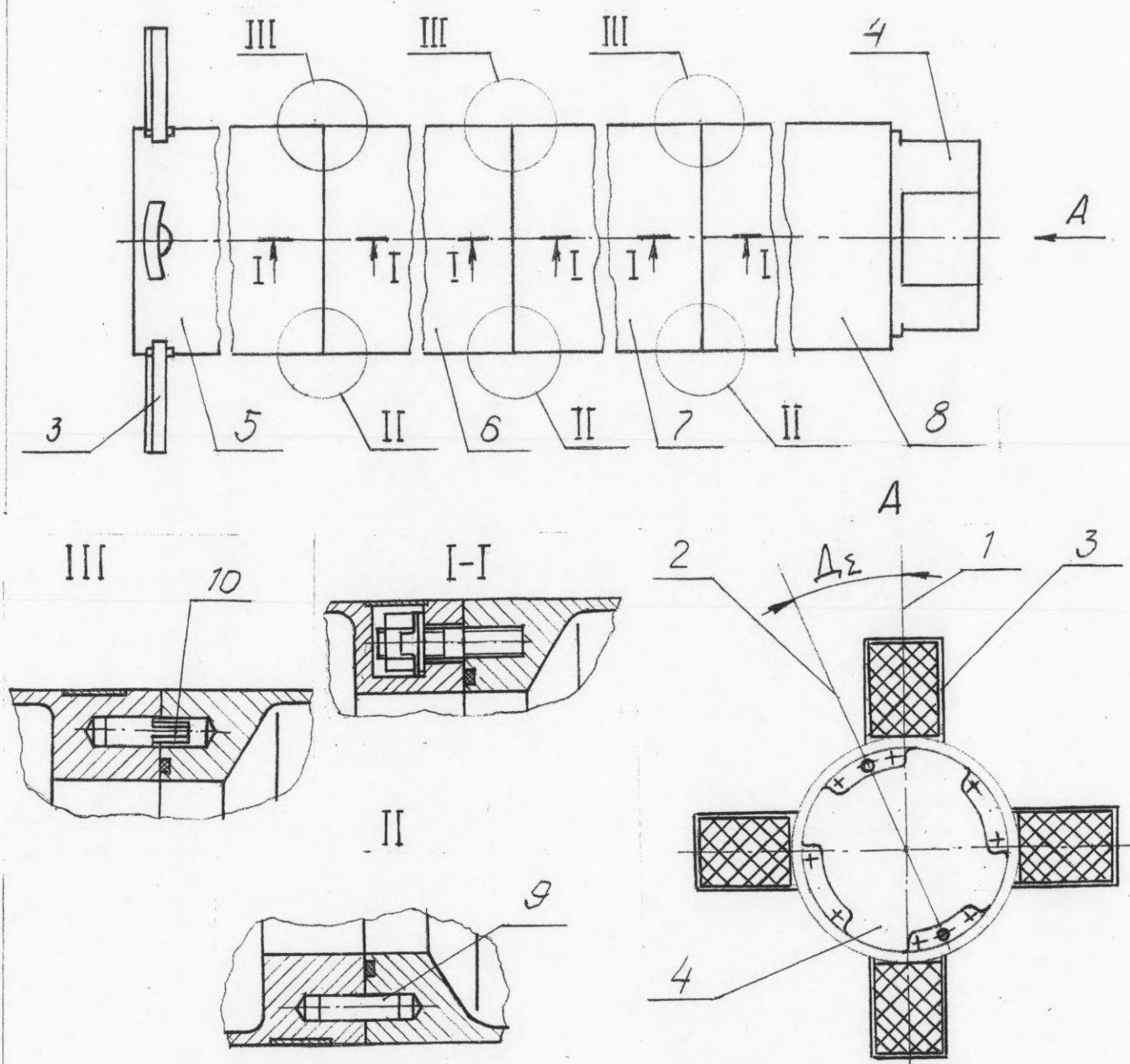


Схема размерной цепи Δ .

1 - вертикальная плоскость аэродинамических органов Управления (АДУ); 2 - вертикальная плоскость блока ИСУ; 3 - аэродинамический орган управления (решетка); 4 - блок ИСУ; 5 - отсек № 4; 6 - отсек № 3; 7 - отсек № 2; 8 - отсек № 1; 9 - штифт цилиндрический; 10 - штифт ромбический.

Δ_4 - отклонение вертикальной плоскости блока ИСУ за счет зазора в соединении цилиндрического штифта отсека № 3 соответным отверстием отсека № 2;
 Δ_5 - отклонение вертикальной плоскости блока ИСУ

за счет отклонения цилиндрического штифта отсека №2 относительно отверстия под цилиндрический штифт отсека №3;

Δ_6 — отклонение вертикальной плоскости блока ИСУ за счет зазора в соединении цилиндрического штифта отсека №2 с ответным отверстием отсека №1;

Δ_7 — отклонение вертикальной плоскости блока ИСУ за счет отклонения цилиндрического штифта для установки блока относительно отверстия под цилиндрический штифт отсека №2;

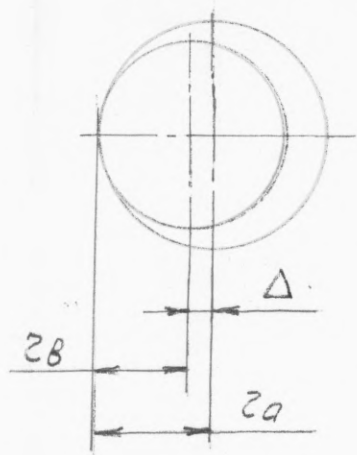
Δ_8 — отклонение вертикальной плоскости блока ИСУ за счет зазора в соединении установочного цилиндрического штифта и блока.

Таблица №1

Составляющее звено	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6	Δ_7	Δ_8
Размер и допустимое отклонение	$\pm 1,5$	$\frac{\phi 8,1^{+0,022}}{\phi 8^{+0,050} + 0,028}$	$\pm 1,5$	$\frac{\phi 8,1^{+0,022}}{\phi 8^{+0,050} + 0,028}$	$\pm 1,5$	$\frac{\phi 8,1^{+0,022}}{\phi 8^{+0,050} + 0,028}$	$\pm 1,5$	$\frac{\phi 8,1^{+0,022}}{\phi 8^{+0,050} + 0,028}$
Передающее отношение	$\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$	1	$\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$	1	$\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$	1	$\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$	1,12

Переопределим звенья Δ_2 , Δ_4 , Δ_6 и Δ_8 в виде линейных размеров в зависимости от зазора в соединении. Для этого выполним вспомогательный расчет.

Схема расчета



$\Delta = z_a - z_b$, где: Δ — линейный размер рассматриваемого звена; z_a — половина диаметра отверстия рассматриваемого соединения; z_b — половина диаметра штифта рассматриваемого соединения.

Далее: $\Delta_{\max} = z_{a\max} - z_{b\min} = 4,061 - 4,014 = 0,047$;
 $\Delta_{\min} = z_{a\min} - z_{b\max} = 4,05 - 4,025 = 0,025$; $\Delta_{\text{ном}} = z_{a\text{ном}} - z_{b\text{ном}} = 4,05 - 4,00 = 0,05$ и окончательно: $\Delta = 0,05 \begin{smallmatrix} -0,003 \\ -0,025 \end{smallmatrix}$.

Следовательно, $\Delta = \Delta_2 = \Delta_4 = \Delta_6 = \Delta_8 = 0,05 \begin{smallmatrix} -0,003 \\ -0,025 \end{smallmatrix}$.

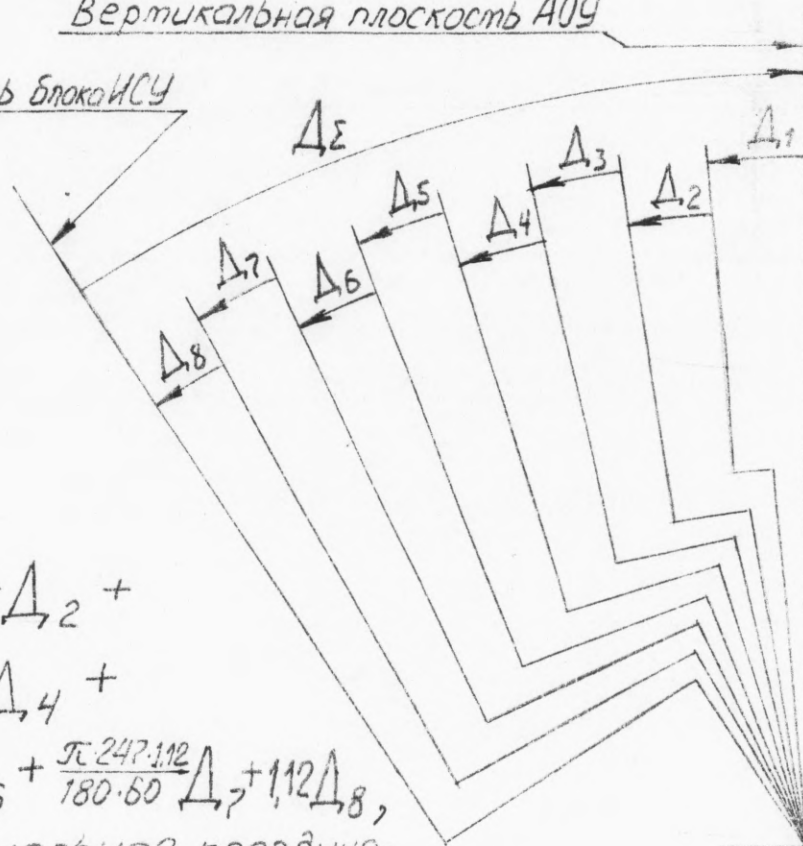
Таблица №2

Составляющее звено	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6	Δ_7	Δ_8
Размер и допускаемое отклонение	$\pm 1,5$	$0,05 \begin{smallmatrix} -0,003 \\ -0,025 \end{smallmatrix}$	$\pm 1,5$	$0,05 \begin{smallmatrix} -0,003 \\ -0,025 \end{smallmatrix}$	$\pm 1,5$	$0,05 \begin{smallmatrix} -0,003 \\ -0,025 \end{smallmatrix}$	$\pm 1,5$	$0,05 \begin{smallmatrix} -0,003 \\ -0,025 \end{smallmatrix}$
Передаточное отношение	$\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$	1	$\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$	1	$\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$	1	$\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}$	1,12

Строим условную размерную цепь для расчета относительного отклонения вертикальных плоскостей АОУ и блока ИСУ и ее уравнение.

Вертикальная плоскость АОУ

Вертикальная плоскость блока ИСУ



$$\Delta_{\Sigma} = \frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60} \cdot \Delta_1 + \Delta_2 + \\ + \frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60} \cdot \Delta_3 + \Delta_4 + \\ + \frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60} \cdot \Delta_5 + \Delta_6 + \frac{\pi \cdot 247 \cdot 112}{180 \cdot 60} \Delta_7 + 1,12 \Delta_8,$$

где: 277 – радиальная координата установочных штифтов крепления отсеков; 247 – радиальная координата установочных штифтов крепления блока ИСУ на отсеке №1.

Перенесем размеры составляющих звеньев, учитывая передаточные отношения, в сводную таблицу (таблица №3). Выполним вспомогательные расчеты, заполним остальные графы таблицы.

Таблица №3

Составляющее звено размерной цепи (Δ_i)	Размер	Верхнее отклонение ($B0$)	Нижнее отклонение ($H0$)	Координата середины поля допуска (α_i)	Половина поля допуска (δ_i)	Квадрат половины поля допуска (δ_i^2)
Δ_1	0	+0,12	-0,12	0	0,12	0,0144
Δ_2	0,05	-0,003	-0,025	-0,014	0,011	0,000121
Δ_3	0	+0,12	-0,12	0	0,12	0,0144
Δ_4	0,05	-0,003	-0,025	-0,014	0,011	0,000121
Δ_5	0	+0,12	-0,12	0	0,12	0,0144
Δ_6	0,05	-0,003	-0,025	-0,014	0,011	0,000121
Δ_7	0	+0,12	-0,12	0	0,12	0,0144
Δ_8	0,056	-0,00336	-0,028	-0,01568	0,01232	0,00015178

Определяем характеристики замыкающего звена.

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_i M_i \Delta_i = 0,206; \quad \alpha_{\Sigma} = \sum_i \alpha_i = -0,05768; \quad \delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_i \delta_i^2} = 0,241;$$

$$(B0)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = -0,05768 + 0,241 = +0,18332;$$

$$(H0)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = -0,05768 - 0,241 = -0,29868;$$

$$\text{и окончательно: } \Delta_{\Sigma} = 0,206^{+0,183}_{-0,299}.$$

Если $\Delta_{\Sigma \text{ max}} = 0,389$, то в угловых единицах это составит $\frac{0,389}{277} = 0,0014$ радиан или $4,8'$.

Только что выполненный расчет размерной цепи представляет наихудший вариант – все зазоры в соединениях выбираются в одну сторону.

Поэтому приведем для сравнения вариант расчета размерной цепи при условии: положение деталей в поле зазора после их сборки произвольное (векторные зазоры).

В этом случае составляющие звенья (из таблицы №1) представляют пространственную размерную цепь: звенья $\Delta_2, \Delta_4, \Delta_6$ и Δ_8 — ошибки от векторных зазоров; $\Delta_1, \Delta_3, \Delta_5$ и Δ_7 — скалярные ошибки.

Передаточные отношения для составляющих звеньев остаются прежними.

Расчет размерной цепи ведем в соответствии с правилами расчета пространственных размерных цепей.

1. Середина поля рассеивания размера замыкающего звена от скалярных ошибок и векторных зазоров равна

$$O(\alpha_\Sigma = 0);$$

2. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена (в квадрате) под действием векторных зазоров:

$$(\delta'_\Sigma)^2 = M_i^2 \delta_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} M_i^2 K_{xi}^2 \delta_i^2, \text{ где } \delta_i = \frac{1}{2}[(N_a - N_b) + (\alpha_{ai} - \alpha_{bi})] + \sqrt{\delta_{\alpha i}^2 + \delta_{\beta i}^2};$$

в нашем случае $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = \frac{1}{2}[(8,1 - 8) + (0,011 - 0,039)] + \sqrt{0,011^2 + 0,011^2} = 0,052;$

$$(\delta'_\Sigma)^2 = 1,12^2 \cdot 0,052^2 + 0,79^2 \cdot 0,052^2 \cdot 3 = 0,00845;$$

3. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена (в квадрате) от скалярных ошибок:

$$(\delta''_\Sigma)^2 = \sum_1^n M_i^2 \cdot \delta_i^2 = \left(\frac{\pi \cdot 277}{180 \cdot 60}\right)^2 \cdot 1,5^2 \cdot 3 + \left(\frac{\pi \cdot 247}{180 \cdot 60} \cdot 1,12\right)^2 \cdot 1,5^2 = 0,0584;$$

4. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена от всех ошибок: $\delta_\Sigma = \sqrt{(\delta'_\Sigma)^2 + (\delta''_\Sigma)^2} =$

$$= \sqrt{0,00845 + 0,0584} = 0,26; \text{ и окончательно: } \Delta'_\Sigma = 0 \pm 0,26.$$

Если $\Delta'_{\Sigma \max} = 0,26$, то в угловых единицах это $\frac{0,26}{277} = 0,00094$ рад или $3,2'$. То есть за счет усложнения технологии сборки можно уменьшить, полученный ранее относительный разворот вертикальных плоскостей АОУ и блока ИСУ, в полтора раза.

ПРИМЕР 10.

Расчет смещения оси отверстия защитного кольца относительно оси пояса уплотнения рабочего колеса центробежного насоса.

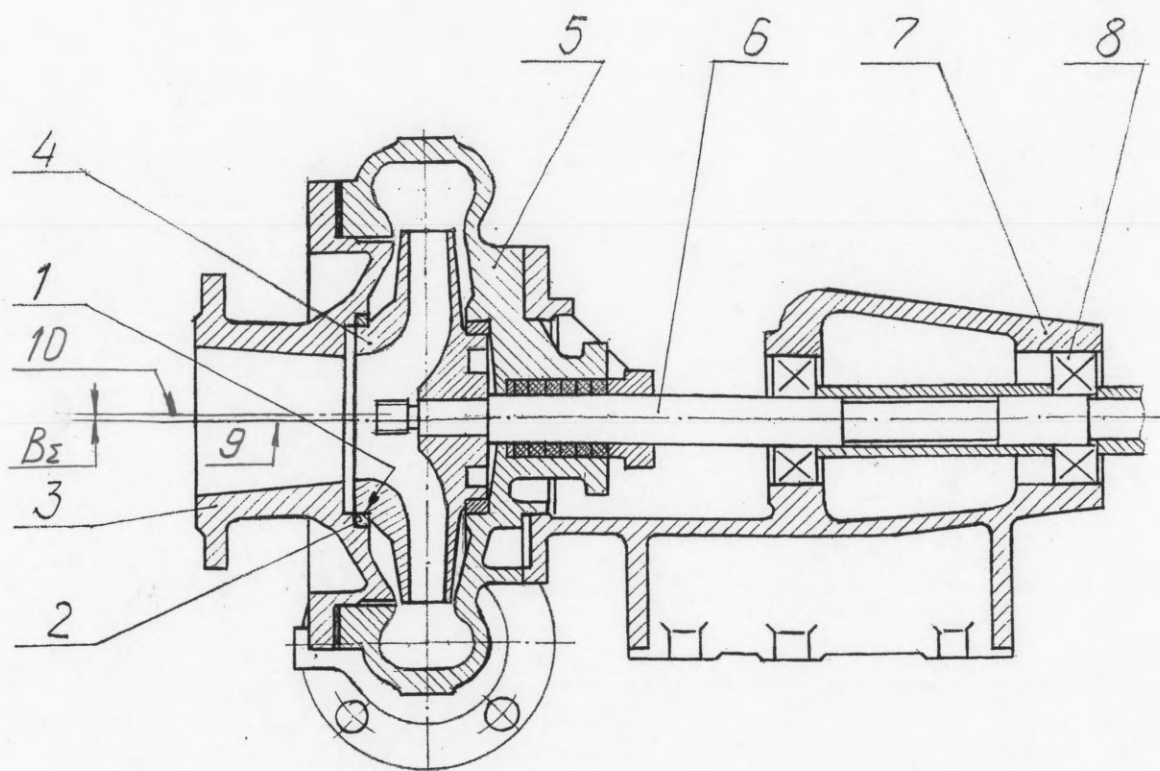


Схема размерной цепи В.

- 1 - пояска уплотняющий; 2 - кольцо защитное; 3 - патрубок всасывающий; 4 - колесо рабочее; 5 - корпус спиральный; 6 - вал; 7 - кронштейн опорный; 8 - шарикоподшипник; 9 - ось отв. защитного кольца; 10 - ось уплотняющего пояса.

Данный расчет является альтернативным вариантом показанному в методике РТМ 23-61, страница 41.

При расчете размеры составляющих звеньев, их отклонения а также передаточные отношения взяты аналогичными принятым в варианте „Методики“.

Сопряжение защитного кольца с уплотняющим поясом рабочего колеса выполняется по посадке с отклонениями $\phi 130 \begin{smallmatrix} +0,10 \\ -0,42 \\ -0,52 \end{smallmatrix}$, обеспечивающей гарантированный диаметральный зазор 0,42 мм. Следовательно, допускаемое отклонение на смещение осей сопрягаемых деталей равно $\pm 0,21$ мм.

Составляющими звеньями данной размерной цепи являются:

- V_1 - смещение оси цилиндрического пояска уплотнения рабочего колеса относительно оси посадочного отверстия;
- V_2 - смещение оси отверстия рабочего колеса относительно оси шейки вала (за счет зазора);
- V_3 - смещение оси шейки вала относительно оси шеек под подшипники;
- V_4 - смещение оси цилиндрического пояска уплотнения рабочего колеса за счет биения внутреннего кольца дальнего подшипника;
- V_5 - смещение оси цилиндрического пояска уплотнения рабочего колеса за счет биения наружного кольца дальнего подшипника;
- V_6 - смещение оси цилиндрического пояска уплотнения рабочего колеса за счет биения внутреннего кольца ближнего подшипника;
- V_7 - смещение оси цилиндрического пояска уплотнения рабочего колеса за счет биения наружного кольца ближнего подшипника;
- V_8 - смещение оси наружных колец подшипников под действием веса деталей относительно оси отверстий в опорном кронштейне (за счет зазора);
- V_9 - смещение оси отверстий под подшипники в опорном кронштейне относительно оси отверстия под спиральный корпус;
- V_{10} - смещение оси отверстия защитного кольца за счет неперпендикулярности торца под спиральный корпус в опорном кронштейне относительно оси отверстий под подшипники;

- B_{11} - смещение оси отверстия в опорном кронштейне относительно центрирующего пояска спирального корпуса (за счет зазора);
- B_{12} - смещение оси отверстия под всасывающий патрубок в спиральном корпусе относительно оси центрирующего пояска;
- B_{13} - смещение оси отверстия защитного кольца за счет непараллельности торцов спирального корпуса относительно друг друга;
- B_{14} - смещение оси отверстия под всасывающий патрубок в спиральном корпусе относительно оси центрирующего пояска всасывающего патрубка (за счет зазора);
- B_{15} - смещение оси центрирующего пояска всасывающего патрубка относительно выточки под защитное кольцо;
- B_{16} - смещение оси наружного диаметра защитного кольца относительно оси отверстия.

Составляющие звенья $B_5, B_7, B_9, B_{10}, B_{12}, B_{13}, B_{15}$ и B_{16} представляют собой векторные ошибки (стационарные векторы), звенья B_2, B_8, B_{11} и B_{14} являются зазорами, а звенья B_1, B_3, B_4 и B_6 - скалярные ошибки (вращающиеся векторы).

Передаточные отношения: $M_1 = M_2 = M_3 = M_8 = M_9 = M_{11} = M_{12} = M_{14} = M_{15} = M_{16} = 1$; $M_4 = M_5 = \frac{550}{236} = 2,33$, где: 550 - расстояние от середины дальнего подшипника до середины защитного кольца, 236 - расстояние между серединами подшипников; $M_6 = M_7 = \frac{314}{236} = 1,33$, где: 314 - расстояние от середины ближнего подшипника до середины защитного кольца; $M_{10} = \frac{133}{100} = 1,33$, где: 133 - расстояние от торца под спиральный корпус в опорном кронштейне до середины защитного кольца.

100 – контрольное расстояние заданного отклонения;
 $M_{13} = \frac{17}{405} = 0,042$, где: 405 – диаметр торцевой поверхности спирального корпуса, 17 – расстояние от торца до середины защитного кольца.

Таблица

Составляющее звено	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8
Размер и допускаемое отклонение	$\pm 0,02$	$\frac{35+0,027}{35-0,017}$	$\pm 0,0075$	0,0075	0,0175	0,0075	0,0175	$\frac{100+0,035}{100-0,015}$
Передающее отношение	1	1	1	2,33	2,33	1,33	1,33	1

продолжение табл.

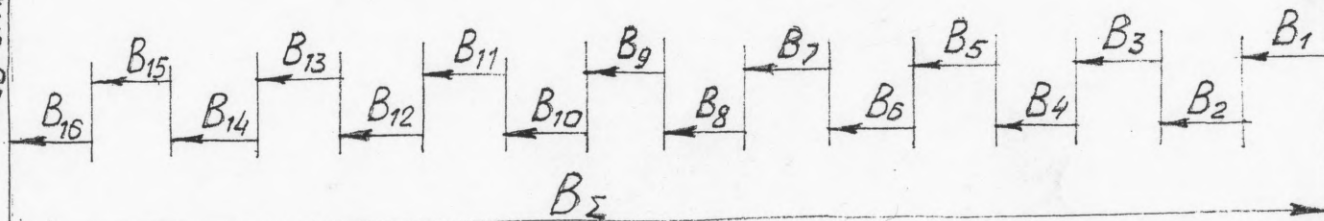
Составляющее звено	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	B_{16}
Размер и допускаемое отклонение	$\pm 0,015$	$\pm 0,02$	$\frac{170+0,08}{170-0,08}$	$\pm 0,015$	0,1	$\frac{330+0,1}{330-0,1}$	$\pm 0,015$	$\pm 0,01$
Передающее отношение	1	1,33	1	1	0,042	1	1	1

Строим условную размерную цепь B и ее уравнение, которые служат наглядным пособием.

$$B_{\Sigma} = B_1 + B_2 + B_3 + 2,33B_4 + 2,33B_5 + 1,33B_6 + 1,33B_7 + B_8 + B_9 + 1,33B_{10} + B_{11} + B_{12} + 0,042B_{13} + B_{15} + B_{16}$$

Ось отв. защитного кольца

Ось пояса уплотнения



Расчет размерной цепи ведем в соответствии с правилами расчета пространственных размерных цепей.

1. Координата середины поля рассеивания замыкающего звена под действием зазоров:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{1}{2} \sum |M_i| [(N_{\alpha_i} - N_{\beta_i}) + (\alpha_{\alpha_i} - \alpha_{\beta_i})] = \frac{1}{2} [(0,0135 - (-0,0085)) + (0,0175 - (-0,0075)) + (0,04 - (-0,04)) + (0,05 - (-0,05))] = 0,1135;$$

2. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена (в квадрате) под действием зазоров:

$$(\delta'_{\Sigma})^2 = \frac{1}{4} \sum_1 M_i^2 (\delta_{\alpha_i}^2 + \delta_{\beta_i}^2) = \frac{1}{4} [(0,0135^2 + 0,0085^2) + (0,0175^2 + 0,0075^2) + (0,04^2 + 0,04^2) + (0,05^2 + 0,05^2)] = 0,00220425;$$

3. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена (в квадрате) под действием векторных ошибок (стационарных):

$$(\delta''_{\Sigma})^2 = M_i^2 \delta_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} M_i^2 \kappa_{x_i}^2 \delta_i^2 = 1,33^2 \cdot 0,02^2 + 0,79^2 (2,33^2 \cdot 0,00875^2 + 1,33^2 \cdot 0,00875^2 + 0,015^2 + 0,015^2 + 0,042^2 \cdot 0,05^2 + 0,015^2 + 0,01^2) = 0,001537919;$$

4. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена (в квадрате) под действием векторных ошибок (вращающихся):

$$(\delta'''_{\Sigma})^2 = \sum_1^n M_i^2 \delta_i^2 = 0,02^2 + 0,0075^2 + 2,33^2 \cdot 0,0075^2 + 1,33^2 \cdot 0,0075^2 = 0,000861126;$$

5. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена под действием всех ошибок:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{(\delta'_{\Sigma})^2 + (\delta''_{\Sigma})^2 + (\delta'''_{\Sigma})^2} = \sqrt{0,00220425 + 0,00153792 + 0,0008611} = 0,0678;$$

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$B_{\Sigma} = 0; (BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = 0,1135 + 0,0678 = 0,18;$$

$$(HO)_{\Sigma} = 0,1135 - 0,0678 = 0,05; \text{ и окончательно: } B_{\Sigma} = 0_{+0,18}^{+0,05}.$$

И так, собираемость узла насоса обеспечена.

ПРИМЕР 11.

Расчет отклонения от прямолинейности оси корпуса из последовательно состыкованных четырех отсеков.

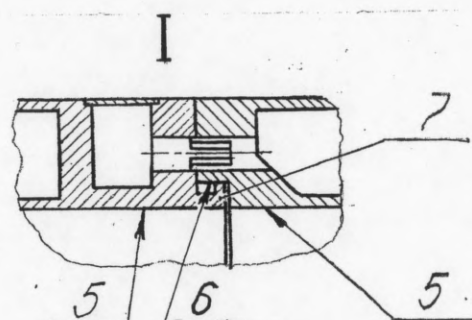
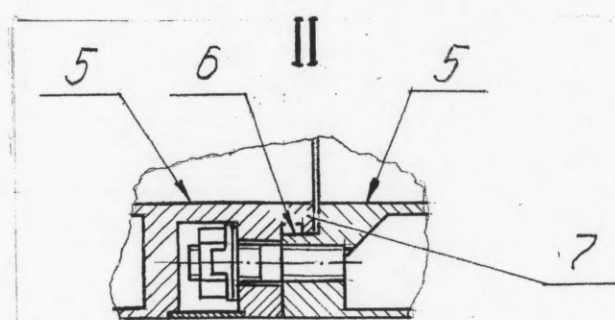
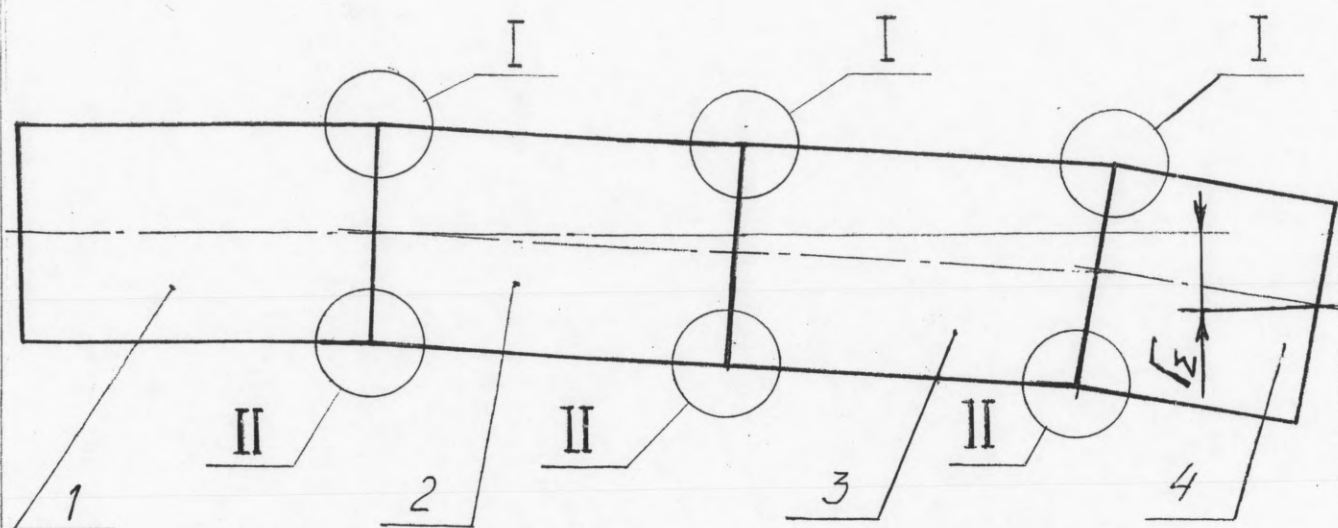


Схема размерной цепи Г.

1 - отсек №1; 2 - отсек №2; 3 - отсек №3; 4 - отсек №4;
5 - поверхность цилиндрическая; 6 - проточка направляющая; 7 - бурт посадочный.

Для обеспечения собираемости корпуса с изделием, размещающимся внутри него, отклонение от прямолинейности оси корпуса должно быть не более 0,25 мм. В противном случае требуется совместная обработка состыкованных отсеков.

За ось отсека принята ось его внутренней цилиндрической поверхности.

Составляющими звеньями данной размерной цепи являются:

Γ_1 - смещение оси корпуса за счет зазора в соедине-

нии отсеков №1 и №2;

Γ_2 - смещение оси корпуса за счет смещения оси посадочного бурта отсека №1 относительно его оси;

Γ_3 - смещение оси корпуса за счет смещения оси направляющей протоочки отсека №2 относительно его оси;

Γ_4 - смещение оси корпуса за счет неперпендикулярности заднего торца отсека №1 относительно его оси;

Γ_5 - смещение оси корпуса за счет неперпендикулярности переднего торца отсека №2 относительно его оси;

Γ_6 - смещение оси корпуса за счет зазора в соединении отсеков №2 и №3;

Γ_7 - смещение оси корпуса за счет смещения оси посадочного бурта отсека №2 относительно его оси;

Γ_8 - смещение оси корпуса за счет смещения оси направляющей протоочки отсека №3 относительно его оси;

Γ_9 - смещение оси корпуса за счет неперпендикулярности заднего торца отсека №2 относительно его оси;

Γ_{10} - смещение оси корпуса за счет неперпендикулярности переднего торца отсека №3 относительно его оси;

Γ_{11} - смещение оси корпуса за счет зазора в соединении отсеков №3 и №4;

Γ_{12} - смещение оси корпуса за счет смещения оси посадочного бурта отсека №3 относительно его оси;

Γ_{13} - смещение оси корпуса за счет смещения оси

направляющей проточки отсека №4 относительно его оси;

Γ_{14} — смещение оси корпуса за счет неперпендикулярности заднего торца отсека №3 относительно его оси;

Γ_{15} — смещение оси корпуса за счет неперпендикулярности переднего торца отсека №4 относительно его оси.

Составляющие звенья $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_7, \Gamma_8, \Gamma_9, \Gamma_{10}, \Gamma_{12}, \Gamma_{13}, \Gamma_{14}$ и Γ_{15} представляют собой векторные ошибки, а звенья Γ_1, Γ_6 и Γ_{11} являются зазорами.

Передаточные отношения: $M_1 = M_2 = M_3 = M_6 = M_7 = M_8 = M_{11} = M_{12} = M_{13} = 1$; $M_4 = M_5 = M_9 = M_{10} = \frac{1500}{578} \cdot 2$; $M_{14} = M_{15} = \frac{940}{578} \cdot 2$; где 578 — наружный диаметр отсеков, 1500 — длина отсеков №2 и №3, 940 — длина отсека №4.

Расчет ведется по наихудшему варианту: зазор выбирается в одну сторону.

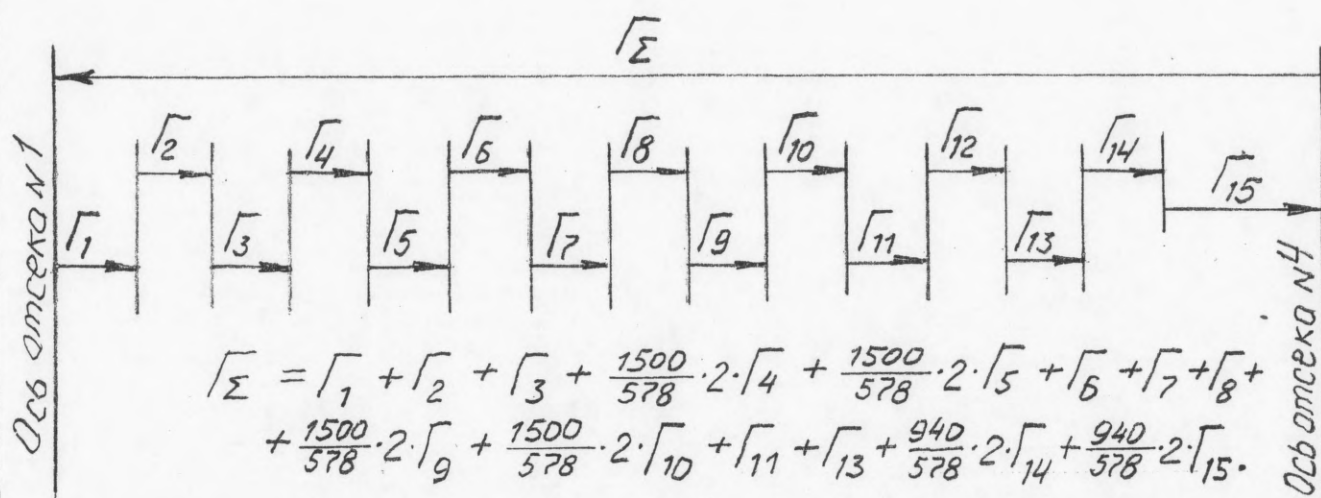
Таблица

Составляющее звено	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4	Γ_5	Γ_6	Γ_7	Γ_8
Размер и допустимое отклонение	$\phi 534 \begin{smallmatrix} +0,175 \\ -0,076 \\ -0,251 \end{smallmatrix}$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	0,1	0,1	$\phi 534 \begin{smallmatrix} +0,175 \\ -0,076 \\ -0,251 \end{smallmatrix}$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
Передачное отношение	1	1	1	$\frac{1500}{578} \cdot 2$	$\frac{1500}{578} \cdot 2$	1	1	1

продолжение табл.

Составляющее звено	Γ_9	Γ_{10}	Γ_{11}	Γ_{12}	Γ_{13}	Γ_{14}	Γ_{15}
Размер и допустимое отклонение	0,1	0,1	$\phi 534 \begin{smallmatrix} +0,175 \\ -0,076 \\ -0,251 \end{smallmatrix}$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	0,1	0,1
Передачное отношение	$\frac{1500}{578} \cdot 2$	$\frac{1500}{578} \cdot 2$	1	1	1	$\frac{940}{578} \cdot 2$	$\frac{940}{578} \cdot 2$

Строим условную размерную цепь Γ и ее уравнение, которые служат наглядным пособием.



Расчет размерной цепи ведем в соответствии с правилами расчета пространственных размерных цепей.

1. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена (в квадрате) под действием векторных ошибок:

$$(\delta'_{\Sigma})^2 = M_i^2 \delta_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} M_i^2 \cdot K_{xi}^2 \cdot \delta_i^2 = \left(\frac{1500}{578} \cdot 2\right)^2 \cdot 0,05^2 + 0,79^2 \cdot \left[\left(\frac{1500}{578} \cdot 2\right)^2 \cdot 0,05^2 \cdot 3 + \left(\frac{940}{578} \cdot 2\right)^2 \cdot 0,05^2 \cdot 2 + 0,05^2 \cdot 6\right] = 0,235819021;$$

2. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена (в квадрате) под действием зазоров:

$$(\delta''_{\Sigma})^2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n M_i^2 (\delta_{ai}^2 + \delta_{bi}^2) = \frac{1}{4} \cdot (0,0875^2 + 0,0875^2) \cdot 3 = 0,011484375;$$

3. Середина поля рассеивания замыкающего звена под действием зазоров:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |M_i| [(N_{ai} - N_{bi}) + (\alpha_{ai} - \alpha_{bi})] = \frac{1}{2} (0,0875 - (-0,1635)) \cdot 3 = 0,3765;$$

4. Половина поля рассеивания размера замыкающего звена под действием всех ошибок:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{(\delta'_{\Sigma})^2 + (\delta''_{\Sigma})^2} = \sqrt{0,235819021 + 0,011484375} = 0,4973;$$

Определяем характеристики замыкающего звена:

$$\Gamma_{\Sigma} = 0; (BO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = 0,3765 + 0,4973 = 0,87;$$

$$(HO)_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = 0,3765 - 0,4973 = -0,12; \text{ и окончательно: } \Gamma_{\Sigma} = 0_{-0,12}^{+0,87}.$$

Следовательно, для обеспечения взаимозаменяемости корпуса требуется совместная обработка состыкованных отсеков.

Использованная литература:

1. Н.А. Бородачев „Обоснование методики расчета допусков и ошибок кинематических цепей“. Часть I. Издательство АН СССР. 1943.
2. Н.А. Бородачев „Обоснование методики расчета допусков и ошибок размерных и кинематических цепей“. Часть II. Издательство АН СССР. 1946.
3. Е.С. Вентцель „Теория вероятностей“. „Высшая школа“, Москва, 2006.
4. В.В. Иванов „Практика расчета размерных цепей в машиностроении“. Машгиз, Москва-Киев, 1960.
5. В.Д. Мягков, М.А. Палей и др. „Допуски и посадки“. Справочник (в двух томах). Л. „Машиностроение“, 1979.
6. РТМ 23-61 „Методика расчета размерных цепей (на базе теории вероятностей)“. Стандартеиз, Москва, 1962.

Содержание.

1.	Что такое „размерная цель“?	2.
2.	Все о размерных целях.	9.
3.	Практика расчета размерных целей.	22.
ПРИМЕР 1.	Расчет зазора между компенсирующим и упорным кольцами.	22.
ПРИМЕР 2.	Расчет суммарного осевого зазора между шестерней и втулками насоса.	30.
ПРИМЕР 3.	Расчет собираемости и качества шпилечного соединения.	34.
ПРИМЕР 4.	Расчет собираемости установочных штифтов одного отсека с ответными отверстиями другого.	37.
ПРИМЕР 5.	Расчет линейного „мертвого“ пространства в цилиндре компрессора.	40.
ПРИМЕР 6.	Проверка собираемости межотсечного соединения.	44.
ПРИМЕР 7.	Расчет габаритного размера детали.	51.
ПРИМЕР 8.	Расчет минимального размера ответных отверстий одного отсека под шпильки другого, обеспечивающих собираемость отсеков вручную.	53.
ПРИМЕР 9.	Расчет углового отклонения вертикальной плоскости аэродинамических органов управления относительно вертикальной плоскости блока ИСУ.	58.
ПРИМЕР 10.	Расчет смещения оси отверстия защитного кольца относительно оси пояса уплотнения рабочего колеса.	64.
ПРИМЕР 11.	Расчет отклонения от прямолинейности оси корпуса из последовательно состыкованных четырех отсеков.	69.
	Использованная литература.	73.